



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**  
**CENTRO TECNOLÓGICO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**  
**ENGENHARIA QUÍMICA**

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA RELAÇÃO  $S_0/X_0$  NA**  
**DETERMINAÇÃO DA ATIVIDADE ESPECÍFICA DE BACTÉRIAS**  
**NITRIFICANTES**

**Estela Claudia Ferretti**

**Prof. Dr. Hugo Moreira Soares**  
ORIENTADOR

**Prof. Dr. Willibaldo Schmidell Netto**  
Co-ORIENTADOR

**Florianópolis, 2005**

**Estela Claudia Ferretti**

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA RELAÇÃO  $S_0/X_0$  NA  
DETERMINAÇÃO DA ATIVIDADE ESPECÍFICA DE BACTÉRIAS  
NITRIFICANTES**

Dissertação apresentada ao Programa  
de Pós-Graduação em Engenharia Química  
da Universidade Federal de Santa Catarina,  
como requisito parcial para a obtenção do  
título de mestre em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Hugo Moreira Soares.

**Florianópolis  
2005**

**Estela Claudia Ferretti**

Dissertação submetida ao corpo docente do programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA QUÍMICA.

Aprovado por:

---

Prof. FLÁVIO RUBENS LAPOLLI, Dr.

---

Prof. REGINA DE F. P. M. MOREIRA, Dr.

---

Prof. WILLIBALDO SCHMIDELL NETTO, Dr.

---

Prof. AGENOR FURIGO JÚNIOR, Dr.  
(Coordenador)

---

Prof. HUGO MOREIRA SOARES, Dr.  
(Orientador)

**Florianópolis, SC – Brasil**

**Março/2005.**

*Dedico este trabalho aos meus  
amigos, que são a família escolhida  
por meu coração.*

## AGRADECIMENTOS

À Deus em primeiro lugar, pelo precioso dom da vida.

À minha mãe (*in memorian*), minha irmã Gisele e a Loiva, pelo amor e pelo incentivo para que eu pudesse alcançar mais um sonho.

Aos professores Hugo e Willibaldo, pela oportunidade da realização deste trabalho, pela orientação e principalmente pela compreensão e paciência durante este período.

Aos amigos Luís Gustavo, Fabrício, Valéria, Cristiane, Angelina e demais colegas do Laboratório por todo o apoio e amizade.

Às amigas da faculdade, Andréia e Adriana, por estarem sempre ao meu lado nos momento mais difíceis. Aos meus amigos: Bruna Rodrigues, Wanessa, Bruna de Oliveira, Éderson, Diego, Rodrigo Lomonaco e Rodrigo Rodrigues, cuja amizade, construída nestes dois anos, fez-me sentir sempre bem acolhida. Às amigas Derce, Artiva, Aline, Janaína, Jaqueline, Roseli e Neiva, pela grande amizade e companheirismo durante todo o mestrado.

Ao professor Agenor e ao Edvilson, pela atenção e cordialidade com que sempre me atenderam na Universidade.

Ao departamento de Engenharia Química, pelos recursos disponibilizados para a realização deste trabalho.

Ao CNPQ, pela concessão da bolsa que tornou viável este trabalho.

Aos membros da banca examinadora, pela atenção e sugestões realizadas.

## ÍNDICE

LISTA DE TABELAS .....	vi
LISTA DE FIGURAS .....	vii
LISTA DE SÍMBOLOS E NOMENCLATURA .....	ix
RESUMO .....	x
ABSTRACT .....	xi
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. OBJETIVOS .....	4
2.1. Objetivo Geral .....	4
2.2. Objetivos Específicos .....	4
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	5
3.1. O Nitrogênio no Meio Ambiente .....	5
3.2. Introdução do Nitrogênio nos Corpos d'água .....	7
3.3. Importância da Remoção das Formas Nitrogenadas .....	9
3.4. Processos de Remoção de Nitrogênio .....	13
3.5. Nitrificação .....	15
3.6. Fatores que Exercem Influência Sobre as Bactérias Nitrificantes .....	19
3.6.1. Influência da Temperatura .....	19
3.6.2. Influência do pH .....	19
3.6.3. Efeito do Oxigênio Dissolvido .....	21
3.6.4. Influência de Inibidores .....	21
3.7. Cinética de Nitrificação .....	23
3.8. Determinação Respirométrica da Atividade Específica .....	27
4. METODOLOGIA .....	34
4.1. Inóculo Utilizado em Ensaio de Atividade Nitrificante .....	34
4.1.1. Preparo e Enriquecimento da Cultura Utilizada .....	34
4.1.2. Monitoramento do Reator .....	37
4.2. Ensaio de Atividade Nitrificante Específica .....	39
4.3. Influência do Nitrito nos Ensaio de Atividade Nitrificante .....	42
4.4. Reprodutibilidade da Queda de Oxigênio .....	43
4.5. Determinação do $K_{La}$ .....	44
4.6. Métodos Analíticos .....	45
4.6.1. Determinação da Amônia .....	45
4.6.2. Determinação de Nitrito .....	46
4.6.3. Determinação de Nitrato .....	46
4.6.4. Determinação de Sólidos Suspensos Voláteis e Sólidos Suspensos Totais ..	47
4.6.5. Determinação do pH .....	47
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	48
5.1. Operação do Reator para Manutenção do Inóculo .....	48
5.2. Medida da Atividade Nitrificante e Obtenção de Parâmetros .....	54
5.3. Influência da Relação $S_0/X_0$ .....	57
5.4. Influência do Nitrito na Atividade da Biomassa Nitrificante .....	64
6. CONCLUSÕES .....	70
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	71
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	72
ANEXOS e APÊNDICES .....	81

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 3.1:</b> Relação de compostos e estado oxidativo do nitrogênio.....	09
<b>Tabela 3.2:</b> Limites ou condições de algumas formas nitrogenadas na água.....	13
<b>Tabela 3.3:</b> Tratamentos físico-químicos de remoção de nitrogênio.....	14
<b>Tabela 3.4:</b> Compostos orgânicos inibidores da nitrificação.....	22
<b>Tabela 4.1:</b> Composição de nutrientes do meio nitrificante sintético (Solução A)....	36
<b>Tabela 4.2:</b> Composição do meio nitrificante sintético (Solução B).....	36
<b>Tabela 4.3:</b> Composição da solução de micronutrientes.....	36
<b>Tabela 4.4:</b> Progressão de carga referente à aclimação do lodo utilizado.....	37
<b>Tabela 4.5:</b> Frequência do acompanhamento analítico do reator.....	38
<b>Tabela 5.1:</b> Velocidade específica de respiração do lodo para diferentes dias de operação do reator.....	53
<b>Tabela 5.2:</b> Velocidade de respiração obtida pelo ajuste dos dados experimentais para o ensaio de atividade específica com 5,83 gSST/L.....	57
<b>Tabela 5.3:</b> Parâmetros estimados através de ajuste aos dados experimentais do 1º Grupo. ....	58
<b>Tabela 5.4:</b> Parâmetros estimados através de ajuste aos dados experimentais do 2º Grupo.....	60
<b>Tabela 5.5:</b> Dados do coeficiente volumétrico de transferência de oxigênio obtidos para os ensaios.....	69

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 3.1:</b> Ciclo do nitrogênio.....	05
<b>Figura 3.2:</b> Curva de equilíbrio químico entre as formas de $\text{NH}_4^+$ e $\text{NH}_3$ à 25°C.....	11
<b>Figura 3.3:</b> Representação gráfica do modelo de Monod.....	24
<b>Figura 3.4:</b> Cinéticas (a) sem inibição e (b) inibidas por S.....	25
<b>Figura 3.5:</b> Relação entre OD e tempo.....	31
<b>Figura 3.6:</b> Efeito da adição de substrato na respiração do lodo.....	32
<b>Figura 4.1:</b> Sequência utilizada na alimentação do reator.....	35
<b>Figura 4.2:</b> Sistema operacional utilizado em ensaios de respirometria.....	40
<b>Figura 5.1:</b> Monitoramento do pH de saída do reator durante o período operacional.....	49
<b>Figura 5.2:</b> Monitoramento da concentração das formas nitrogenadas do reator.....	50
<b>Figura 5.3:</b> Conversão de N- $\text{NH}_4$ em N- $\text{NO}_2$ durante o período operacional.....	51
<b>Figura 5.4:</b> Variações dos sólidos suspensos durante a operação do reator.....	52
<b>Figura 5.5:</b> Acompanhamento da velocidade específica de consumo de oxigênio da biomassa presente no reator.....	53
<b>Figura 5.6:</b> Variação da concentração de oxigênio dissolvido em função do tempo para ensaio típico de respirometria.	55
<b>Figura 5.7:</b> Dados experimentais obtidos para ensaio com 5,83gSST/L e ajuste aos modelos cinéticos.....	56
<b>Figura 5.8:</b> Curva de $Q_{O_2}$ para diferentes concentrações celulares obtidas para o lodo entre o 215° e 224° dia de operação do reator.....	58
<b>Figura 5.9:</b> Curva de $Q_{O_2}$ para diferentes concentrações celulares obtidas para o lodo entre o 255° e 293° dia de operação do reator.....	60
<b>Figura 5.10:</b> Relação entre $Q_{O_2}X/Q_{O_2}X_{\text{máx}}$ e S para os ensaios realizados entre o 215° e 224° dia.....	61
<b>Figura 5.11:</b> Relação entre $Q_{O_2}X/Q_{O_2}X_{\text{máx}}$ e S para os ensaios realizados entre o 255° e 293° dia.....	62
<b>Figura 5.12:</b> Relação entre $Q_{O_2}$ e S/SST para os ensaios realizados entre o 215° e 224° dia.....	63
<b>Figura 5.13:</b> Relação entre $Q_{O_2}$ e S/SST para os ensaios realizados entre o 255° e 293° dia.....	63



<b>Figura 5.14:</b> Influência do acúmulo de nitrito no meio sobre as velocidades específicas de respiração.....	64
<b>Figura 5.15:</b> Concentrações de nitrito obtidas para diferentes concentrações celulares.....	66
<b>Figura 5.16:</b> Seqüência de medidas de $Q_{O_2}$ para diferentes concentrações de substrato.....	67
<b>Figura 5.17:</b> Curva de OD em função do tempo obtida em diferentes meios.....	68
<b>Figura 5.18:</b> Curva de $\ln(C^*-C_{O_2})/(C^*-C_{O_{2i}})$ em função do tempo obtida para a determinação do $K_{La}$ .....	69

## LISTA DE SÍMBOLOS E NOMENCLATURA

$C(i)$	Concentração do composto i	$\text{mg i.L}^{-1}$
$C^*$	Concentração de oxigênio dissolvido na saturação	$\text{mgO}_2.\text{L}^{-1}$
$C_{02E}$	Concentração de oxigênio dissolvido na entrada	$\text{mgO}_2.\text{L}^{-1}$
$C_{02i}$	Concentração de oxigênio dissolvido no instante inicial	$\text{mgO}_2.\text{L}^{-1}$
DBO	Demanda bioquímica de oxigênio	$\text{mgO}_2.\text{L}^{-1}$
$K_S$	Constante de saturação	$\text{mg.L}^{-1}$
$K_I$	Constante de inibição	$\text{mg.L}^{-1}$
OD	Oxigênio dissolvido	$\text{mgO}_2.\text{L}^{-1}$
$q$	Carga	$\text{mgN-NH}_4.(\text{L.d})^{-1}$
$Q$	Vazão de líquido	$\text{L.min}^{-1}$
$Q_{O_2}$	Velocidade específica de consumo de oxigênio	$\text{mgO}_2.(\text{gSST.min})^{-1}$
$Q_{O_2X}$	Velocidade de consumo de oxigênio	$\text{mgO}_2.(\text{L.min})^{-1}$
$r_0$	Velocidade de respiração	$\text{mgO}_2.(\text{L.min})^{-1}$
$S$	Concentração de substrato	$\text{mg.L}^{-1}$
$S_0$	Concentração inicial de substrato	$\text{mg.L}^{-1}$
$S_{\text{máx}}$	Concentração máxima de substrato para $\mu_{\text{máx}}$	$\text{mg.L}^{-1}$
$S_m$	Concentração máxima de substrato	$\text{mg.L}^{-1}$
SSV	Sólidos suspensos voláteis	$\text{gSSV.L}^{-1}$
SST	Sólidos suspensos totais	$\text{gSST.L}^{-1}$
$T$	Temperatura	$^{\circ}\text{C}$
TRH	Tempo de retenção hidráulica	d
$V$	Volume	L
$V_{SR}$	Volume de sobrenadante retirado do reator (saída)	L
$X_0$	Concentração celular	$\text{g SST.L}^{-1}$ ou $\text{g SSV.L}^{-1}$
$Y$	Coefficiente de rendimento celular	$\text{gSSV.gS}^{-1}$
$\mu_X$	Velocidade específica de crescimento	$\text{d}^{-1}$ ou $\text{h}^{-1}$
$\mu_{\text{máx}}$	Velocidade específica máxima de crescimento	$\text{d}^{-1}$ ou $\text{h}^{-1}$
$\Delta G^{\circ}$	Variação da energia livre de Gibbs	$\text{KJ.}(\text{mol N-NH}_4^+)^{-1}$
$n_L$	Coefficiente de Luong	

## RESUMO

Nos processos de remoção biológica de nitrogênio, a etapa de nitrificação, que consiste na oxidação do amônio a nitrato, é considerada, muitas vezes, como a etapa limitante na eliminação deste nutriente. Tendo isto em vista, executar um estudo acerca da capacidade das bactérias nitrificantes torna-se uma tarefa de vital importância para o projeto e controle de biorreatores. Um modo de se realizar a medida desta atividade se dá através de métodos que envolvem a respirometria, que, apesar de ser uma técnica bem conhecida, tem suas particularidades, merecendo um estudo de forma a estabelecer as principais diretrizes de execução dos respectivos ensaios. Esta metodologia possibilita a determinação de parâmetros cinéticos de modelos consagrados na literatura, que permitem então caracterizar a atividade dessas células. Neste sentido, este trabalho teve como objetivo verificar a influência da concentração celular sobre a metodologia adotada de respirometria, promovendo a escolha de uma relação entre substrato e biomassa para a realização de testes de atividade específica. Para os ensaios, utilizou-se como material biológico um lodo proveniente de uma unidade de tratamento de esgotos domésticos da cidade de Florianópolis – CASAN, que foi previamente adaptado de forma a obter-se um lodo enriquecido com as bactérias nitrificantes. Os experimentos foram realizados utilizando-se um erlenmeyer adaptado para permitir o acoplamento de um eletrodo de pH e um sensor para a medida da concentração de oxigênio dissolvido e temperatura. Utilizou-se um agitador magnético com aquecimento para manter o sistema sob agitação constante (300 rpm) e a temperatura de 35°C. O pH foi mantido em torno de 7,5. Uma solução sintética contendo  $\text{NH}_4\text{Cl}$  foi utilizada como fonte de substrato. A concentração celular utilizada nos ensaios foram de 0,5 até 5,8 gSST/L, sendo que para cada uma dessas a concentração de substrato a qual a biomassa foi exposta também sofreu variação de 0 a aproximadamente 1000 mgN- $\text{NH}_4$ /L. A partir dos resultados obtidos observou-se a ocorrência de inibição da atividade nitrificante quando a biomassa era exposta a altas quantidades de substrato e, sendo assim, o modelo de Andrews foi utilizado para o ajuste aos pontos experimentais. O valor máximo de atividade da biomassa foi atingido em uma faixa de  $S_0/X_0$  entre 50 e 100 mg N- $\text{NH}_4$ /gSST.

**Palavras-chave:** nitrificação, atividade nitrificante, respirometria, relação  $S_0/X_0$ .

## ABSTRACT

The nitrification, which consists of the oxidation of the ammonium to nitrate, is considered the limitant stage in many biological nitrogen removal processes. Therefore, to execute a study concerning the nitrifying biomass activity becomes a task of vital importance for design and control of bioreactors. A way of accomplishing the measure of this activity is through methods that involve the respirometry, which besides being a well know technique, it has its own particularities and it needs a further study in order to establish the main guidelines to perform the assays. The respirometric measurements make it possible to evaluate the biomass kinetic parameters from models found in the literature, which make possible to characterize the activity of those cells. In this sense, the aim of this work was to examine the influence of the cell concentration within the adopted methodology and to select a relation between the substrate and biomass for the accomplishment of tests of specific activity. The biomass was taken from Florianópolis unit of domestic sewers treatment plant (CASAN), which was previously adapted to obtain enriched nitrifying sludge. The experiments were accomplished through the use of an erlenmeyer flask adapted to allow measurement of a pH and dissolved oxygen concentration. A magnetic stirrer was used to maintain the system under well-defined experimental conditions (300 rpm and 35°C). The pH was maintained around 7.5 during the experiments. A synthetic solution containing  $\text{NH}_4\text{Cl}$  was used as substrate source. The biomass concentration used in the assays were from 0.5 to 5.8 gSST/L, and each one of these substrate concentration also suffered an approximate variation from 0 to 1,000 mgN-NH<sub>4</sub> /L. By the obtained results it was noticed the occurrence of inhibition of the nitrifying activity when the biomass was exposed to high amounts of substrate and for this reason the model of Andrews was used for the adjustment of the experimental points. The maximum value of the biomass activity was reached in  $S_0/X_0$  ratios between 50 and 100 mg N-NH<sub>4</sub>/gSST.

**Key-words:** nitrification, nitrifying activity, respirometry,  $S_0/X_0$  ratios.

## 1. INTRODUÇÃO

O crescente aumento populacional e o desenvolvimento industrial têm intensificado os conseqüentes efeitos negativos que as atividades humanas exercem sobre o meio ambiente, através do uso indiscriminado de fontes hídricas e incremento da poluição gerada. Segundo a Fundação do Meio Ambiente – FATMA, 80% dos recursos hídricos catarinenses têm sua qualidade seriamente comprometida, em decorrência da degradação de recursos naturais (SEDUMA, 1990 e OLIVEIRA *et al*, 1993 <sup>1</sup>*apud* BAVARESCO, 1998). A atividade suinícola existente em Santa Catarina auxilia na indução do lançamento de dejetos em cursos d'água ocasionando problemas ambientais de grandes proporções no ecossistema existente. Segundo uma publicação na revista Anuário Expressão Ecologia, em Santa Catarina, a poluição em decorrência do rebanho do estado, equivale a de uma população de quase 30 milhões de habitantes, sendo 5 vezes maior que a população do estado em si (6 milhões). O mais agravante é que, do total, somente 5% é tratado, sendo o restante despejado contaminando rios e mananciais e afetando diretamente a saúde pública.

Dentre os compostos poluentes que se encontram, não somente em dejetos suínos, mas em matérias orgânicas que necessitam de um tratamento, está o nitrogênio. O nitrogênio orgânico decorrente das fontes poluidoras é biologicamente degradado de forma natural pelos corpos d'água caracterizando assim o fenômeno de autodepuração. Este fenômeno ocorre desde que a carga de compostos nitrogenados não sobrecarregue esta capacidade natural de degradação. Caso isto ocorra, fenômenos como a eutrofização e contaminação destes corpos hídricos podem ocorrer. A eutrofização é o demasiado crescimento de plantas e algas provocado pela presença de nutrientes em excesso nos corpos d'água. Tais níveis de eutrofização podem ocorrer de forma a ocasionar a falta de oxigênio disponível para outras formas de vida presentes no

---

<sup>1</sup> SEDUMA – Secretaria do Estado do Desenvolvimento Urbano e do Meio Ambiente. “Projeto integrado de controle de poluição pela suinocultura”. (Projeto Água Limpa), Florianópolis –SC, 12p., 1990.

OLIVEIRA, P. A. V., “Manual de manejo e utilização dos dejetos de suínos”. Ed. EMBRAPA – CNPSA, Documentos No 27-0101/6245, Concórdia, SC, 188p., 1993.

ambiente aquático e, ainda, causar graves interferências em relação aos usos desejáveis do corpo d'água. A descarga de efluentes pode ainda representar uma ameaça à saúde pública devido à contaminação dos recursos hídricos locais com bactérias e vírus patogênicos (SOARES, 1999).

Outro aspecto importante é a formação de produtos de caráter nocivo, intermediários das reações biológicas de depuração, que podem estar presentes na água potável. Segundo WIESMANN (1994), elevadas concentrações de nitrito e nitrato podem ocasionar a metahemoglobinemia em recém nascidos, além de apresentarem efeitos carcinogênicos quando ingeridos pelo homem.

A fim de assegurar a não ocorrência de prejuízos irreparáveis ao meio ambiente e garantir a qualidade de vida populacional, há uma grande preocupação governamental e de centros de pesquisa no que se refere ao desenvolvimento de tecnologias que possam reverter as possíveis degradações dos recursos naturais (ISOLDI & KOETZ, 2004).

Os compostos nitrogenados podem ser removidos de efluentes por intermédio de tratamentos químicos, físicos ou biológicos. Os processos biológicos de remoção de nitrogênio apresentam-se muito simples, eficazes e de fácil projeto e operação, quando comparados a métodos físico-químicos. Desta forma, os processos biológicos de remoção de nitrogênio estão encontrando crescentes aplicações, mesmo sob condições adversas, e vêm substituindo os processos físico-químicos, com melhores custos operacionais (FERREIRA, 2000).

Dentre os sistemas biológicos para a remoção de nitrogênio, o processo de Nitrificação/Desnitrificação é o que vem sendo estudado e utilizado há mais tempo. Entre estas duas etapas, a nitrificação é aquela que necessita de maior atenção, pois envolve a necessidade de um suprimento de ar suficiente para manter o processo a contento, produz nitrito como composto intermediário que, se acumulado, pode promover a inibição no sistema e, ainda, produz acidez em suas reações acarretando na necessidade da adição de agentes alcalinizantes para a manutenção do pH ideal para sua

ocorrência. Além disto, as bactérias oxidadoras de amônio envolvidas tem baixa velocidade de crescimento, o que delonga o período de partida dos reatores. Pode-se dizer que estas bactérias são extremamente sensíveis a uma variedade de inibidores (GRUNDITZ e DALHAMMAR, 2001).

Devido a estas particularidades é de extrema importância para o projeto e operação adequados de um sistema se conhecer melhor a capacidade dos microrganismos envolvidos no processo, caracterizando o inóculo utilizado para dar a partida em um reator, bem como acompanhando o seu desenvolvimento em termos de atividade de nitrificação através de ensaios cinéticos específicos.

A cinética dos processos biológicos pode ser abordada partindo-se de modelos consagrados e pelo desenvolvimento de métodos para uma rápida caracterização da atividade de uma determinada biomassa, bem como métodos detectores de inibição quanto a suas tolerâncias de toxidez e carga. O estudo da cinética de nitrificação vem sendo apresentado em diversos trabalhos, e neste contexto, a medida do consumo de oxigênio tem um destaque importante devido a fatores como facilidade e rapidez de realização, maior sensibilidade às variações e a possibilidade de medidas on-line durante os ensaios, permitindo automação do mesmo.

O presente trabalho visa, desta forma, contribuir para o desenvolvimento de testes de atividade nitrificante específica respirométrica, indicando algumas diretrizes básicas para a realização dos mesmos.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GERAL**

Realizar um estudo acerca dos ensaios de atividade específica nitrificante através do uso da técnica respirométrica visando a caracterização e acompanhamento de uma biomassa empregada em processos biológicos de remoção de nitrogênio.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

⇒ Estabelecer uma flora de microrganismos nitrificantes, partido de uma cultura mista, visando sua utilização em ensaios de atividade nitrificante.

⇒ Estabelecer uma metodologia, rápida e simples, para a medida da atividade de bactérias nitrificantes baseada na medida do consumo de oxigênio ao longo do tempo (respirometria).

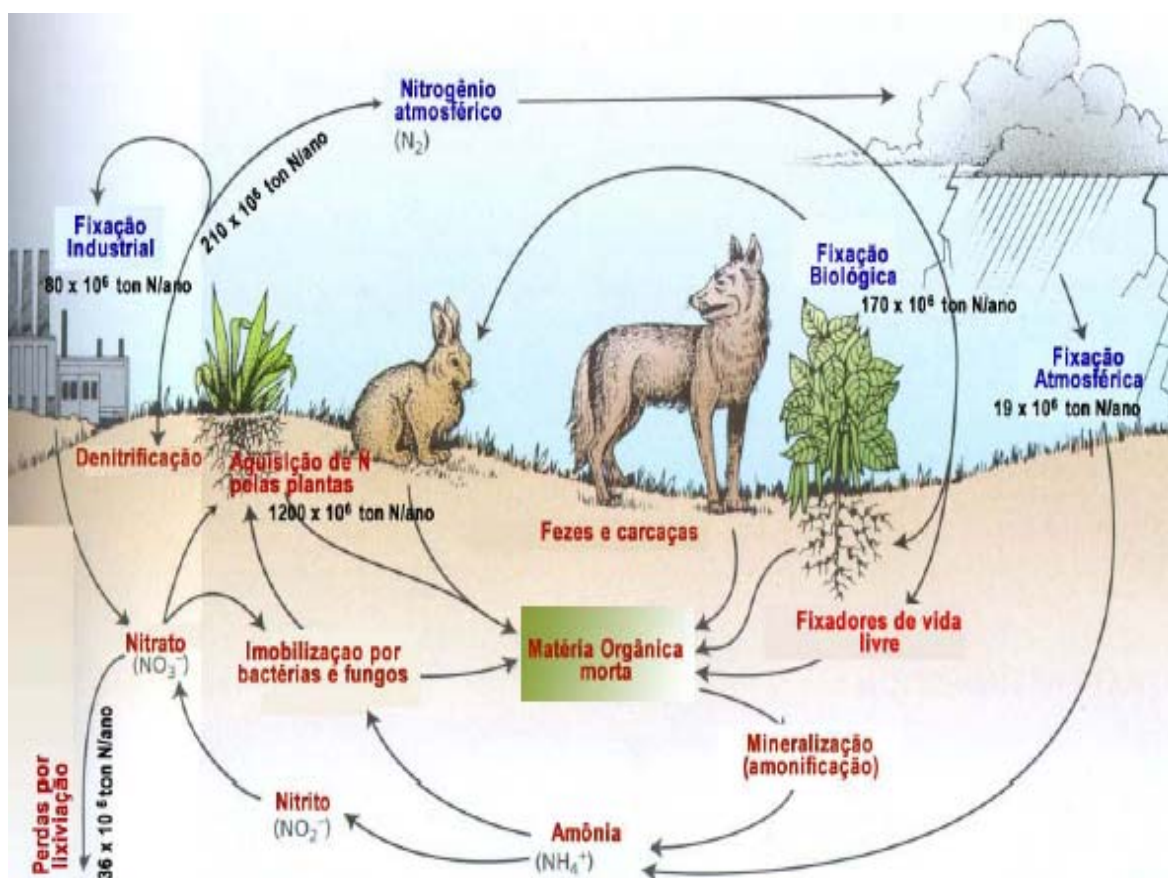
⇒ Avaliar a influência da relação entre o substrato e a concentração de biomassa ( $S_0/X_0$ ) na atividade nitrificante identificando a melhor faixa desta relação para a realização dos ensaios.



### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. O NITROGÊNIO NO MEIO AMBIENTE

O nitrogênio (N) é um elemento químico de suma importância na composição de uma vasta gama de moléculas orgânicas, como proteínas e ácidos nucleicos, que são essenciais aos seres vivos (HAGOPIAN & RILEY, 1998). Desta forma, o nitrogênio atua como um dos principais fatores limitantes à vida, participando de processos primários na dinâmica dos ecossistemas. Compreende-se, assim, a significativa importância do estudo do ciclo do nitrogênio na natureza. A Figura 3.1 representa de forma esquemática, as principais origens e o processo cíclico envolvido nas transformações do nitrogênio, da forma inorgânica à orgânica, e vice-versa, dentro das cadeias tróficas da biosfera.



**Figura 3.1:** Ciclo do nitrogênio.  
(Fonte: LOUREIRO, 2005)

O nitrogênio gasoso ( $N_2$ ) se apresenta disponível em grande quantidade no ar (78%), porém a assimilação desta forma não é possível de ser realizada por grande parte dos seres vivos (EPA, 1975). A captação do nitrogênio e incorporação deste à cadeia alimentar pode ser feita por organismos como bactérias e algas verde-azuis (cianobactérias) pela conversão do  $N_2$  em sais de amônio. Este processo é denominado como fixação e pode ocorrer, de forma não-simbiótica, pela ação de microrganismos que vivem livre e independentes no solo, ou simbiótica, por microrganismos que vivem normalmente associados às raízes de plantas leguminosas.

Dentre as bactérias que realizam a fixação não-simbiótica do nitrogênio, se pode citar as bactérias do gênero *Azotobacter* e *Clostridium*. A fixação simbiótica é realizada pelas bactérias do gênero *Rhizobium* numa relação de mutualismo. Essas bactérias transformam o nitrogênio em sais nitrogenados que são utilizados pelas plantas leguminosas que, em contrapartida, fornecem açúcares e outros compostos orgânicos às bactérias através de seus nódulos. (PELCZAR *et al*, 1981).

O nitrogênio gasoso ainda pode ser introduzido ao ciclo pela sua oxidação através de relâmpagos e posterior incorporação ao solo através da chuva na forma de  $HNO_3$ . Porém, a maior parte da fixação de nitrogênio na Terra (85%) é realizada biologicamente (BROCK, 1996).

Os vegetais podem assimilar o nitrogênio na forma de  $NH_4^+$  e ainda sob a forma de  $NO_3^-$ , utilizando a conversão destes para a formação de proteínas. Estas plantas, por sua vez, servem de alimento para animais, dando continuidade ao ciclo.

Através da morte ou excreções de seres vivos, as formas nitrogenadas chegam ao solo onde ocorre a decomposição do material orgânico por ação biológica de grupos de bactérias e fungos. Um dos estágios finais da decomposição do material nitrogenado é a digestão enzimática de proteínas e compostos afins com liberação de aminas e aminoácidos. Este processo é conhecido como aminação. As aminas e aminoácidos liberados são posteriormente atacados também por microrganismos heterotróficos

(bactérias, fungos e actinomicetos) liberando compostos amoniacaais em uma etapa chamada de amonificação.

Ainda no solo e sob condições aeróbias, o íon amônio é oxidado a nitrito pela ação de microrganismos como *Nitrosomonas* e *Nitrosococcus* em um processo chamado de nitritação. Posteriormente em uma outra etapa denominada de nitratação, o nitrito é convertido à nitrato pela ação de bactérias do gênero *Nitrobacter*, entre outras (BROCK, 1996). A nitritação e a nitratação representam, em conjunto, o processo de nitrificação.

Os íons  $\text{NO}_3^-$ , resultantes da nitrificação, podem ser utilizados para a obtenção de energia, funcionando como aceptores de elétrons na ausência do oxigênio por bactérias, como as do gênero *Pseudomonas*. Este processo é chamado de desnitrificação e por meio deste é realizado o retorno do nitrogênio gasoso à atmosfera.

### 3.2. INTRODUÇÃO DO NITROGÊNIO NOS CORPOS D'ÁGUA

Compostos nitrogenados podem ser introduzidos em corpos hídricos através de fontes naturais ou como consequência de atividades antropogênicas. A fixação biológica, processos de precipitações, escoamento e drenagem rural são alguns exemplos de fontes naturais de nitrogênio. Pode-se ainda considerar a influência de atividades humanas sobre os processos naturais, como nos casos em que a precipitação tem seu teor de nitrogênio elevado, resultante da combustão fóssil ou aplicações de fertilização agrícola de amônia líquida liberada por volatilização na atmosfera (EPA,1975).

As fontes naturais de compostos nitrogenados provenientes do meio rural vêm da decomposição de plantas e animais ou ainda por contribuições dos animais habitantes deste meio através do nitrogênio contido nas suas fezes e urina. Esses compostos são introduzidos nos corpos d'água pela infiltração no solo, do escoamento superficial de águas ou pela erosão das encostas dos rios.

As fontes antropogênicas abrangem atividades industriais, escoamento de águas em centros urbanos, usos de fertilizantes no meio rural e despejo de matéria fecal e urina em corpos d'água sem tratamento adequado.

A drenagem superficial de águas em áreas urbanas pode colaborar com o acréscimo de nitrogênio através do carreamento de partículas e de uma variedade de materiais, incluindo resíduos sólidos provenientes do lixo mal acondicionado ou não coletado.

Dentre atividades industriais que geram efluentes com nitrogênio em altos teores pode-se citar: refinarias de petróleo, curtumes, produção de fertilizantes e indústrias de alimentos, dentre as quais destacam-se usinas de açúcar e álcool, frigoríficos, cervejarias e indústrias químicas em geral (WATER POLLUTION CONTROL FEDERATION, 1991; FARIAS, 2000). Segundo HARTINGER (1994), a indústria metalúrgica e de tratamento de superfície geram amônia e compostos amoniacais pela destruição dos cianatos e emprego de sais de amônia em banhos de soluções alcalinas e de zinco ácido.

Os dejetos provenientes da criação de animais para abate também contribuem como fonte de nitrogênio. Nas águas residuárias provenientes do manejo de suínos, por exemplo, 90 % do nitrogênio total dissolvido, provêm da degradação da matéria orgânica e se encontra na forma de amônia (LIAO *et al*, 1995).

O material fecal e a urina são as principais fontes de nitrogênio em esgotos domésticos. Nestes, as formas mais comumente encontradas de nitrogênio são: nitrogênio orgânico, amoniacal, nitrato e nitrito, sendo este último instável e logo oxidado a nitrato.

Pode-se ainda dizer que em esgotos domésticos frescos, cerca de 60% do nitrogênio presente está sob a forma orgânica e 40% na forma amoniacal (JENKINS & HERMANOWICZ, 1991). Porém, devido à ação bacteriana sob o material protéico e hidrólise da uréia, o esgoto afluente, em estações de tratamento, se encontra com

aproximadamente 75% de nitrogênio amoniacal, sendo o restante nitrogênio orgânico (VAN HAANDEL & MARAIS, 1999). A concentração do nitrogênio amoniacal presente nestes esgotos domésticos encontra-se próxima a  $35 \text{ mg N-NH}_4^+/\text{L}^{-1}$  que se apresenta de forma diluída se comparada com outros efluentes ricos em nitrogênio.

### 3.3. IMPORTÂNCIA DA REMOÇÃO DAS FORMAS NITROGENADAS

Em corpos hídricos, a matéria orgânica carbonácea e nitrogenada é convertida em produtos inertes por mecanismos puramente naturais, caracterizando o assim chamado fenômeno da autodepuração (ISOLDI & KOETZ, 2004).

Neste contexto, a relativa concentração de diferentes formas de nitrogênio pode ser um indicativo do estágio de poluição ocasionada pelo descarte de efluentes e ainda da eficiente depuração destes pela própria natureza do corpo receptor. O nitrogênio pode existir sob quatro formas em águas residuais, que são nitrogênio orgânico, nitrogênio amoniacal, nitrogênio como nitrito e nitrato (METCALF & EDDY, 1991). Assim, um corpo d'água contendo altas concentrações de nitrogênio orgânico e amônia e baixas concentrações de nitrito e nitrato, não pode ser considerado seguro. Por outro lado, a ausência de nitrogênio orgânico e amônia e a presença de algum nitrato, sugerem um corpo d'água com poluição remota, pois a nitrificação já ocorreu (TEBBUTT, 1992).

Algumas dessas espécies foram relacionadas aos seus estados oxidativos por HAGOPIAN e RILEY (1998), as quais estão apresentadas na Tabela 3.1.

**Tabela 3.1:** Relação de compostos e estado oxidativo do nitrogênio.

Espécie	Nome	Estado de oxidação
$\text{NH}_3$	Amônia	- 3
$\text{NH}_4^+$	Amônio	-3
$\text{NO}_2^-$	Nitrito	+3
$\text{NO}_3^-$	Nitrato	+5

Fonte: HAGOPIAN e RILEY (1998).

Segundo VON SPERLING (1997), a amônia existente em solução aquosa pode apresentar-se na forma de íon amônio ( $NH_4^+$ ) ou na forma de amônia livre ( $NH_3$ ). O equilíbrio dinâmico entre estas duas formas na água é fortemente dependente do pH e da temperatura.

Segundo WIESMANN (1994) o equilíbrio entre estas formas, pode ser expresso pela reação 3.1 e pela equação 3.2:



$$C_{N-NH_3} = \frac{C_{N-NH_4^+} \cdot 10^{pH}}{Ka} \quad (3.2)$$

Onde,

$C_{N-NH_3}$  = Concentração de amônia no meio;

$C_{N-NH_4^+}$  = Concentração de amônio no meio;

$pH$  = pH do meio contendo estas formas;

$Ka$  = Constante de equilíbrio.

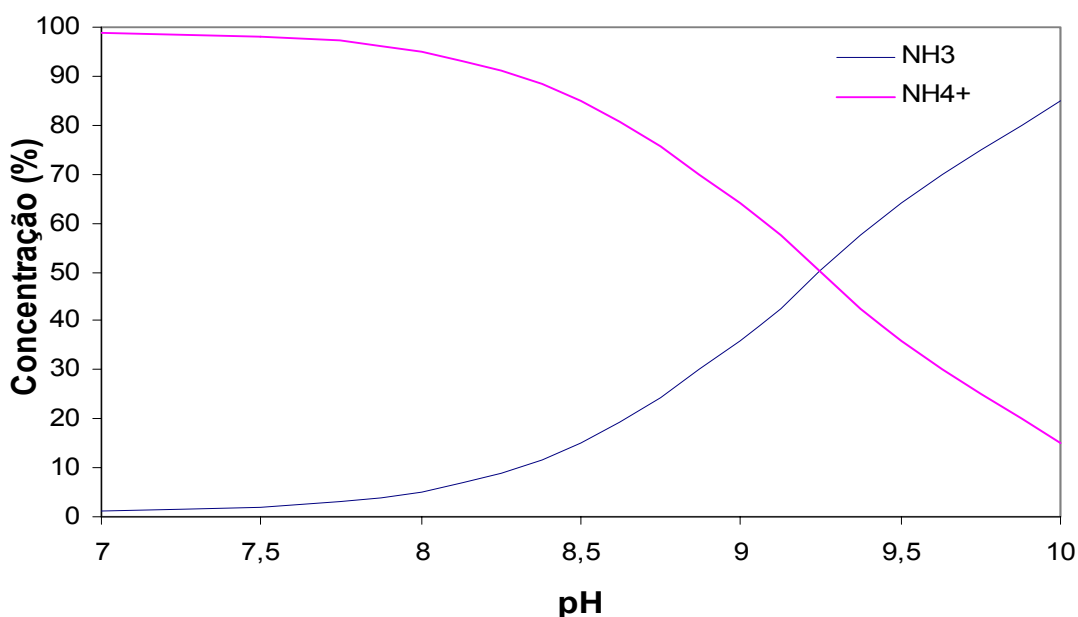
A constante de equilíbrio pode ser representada pela Equação 3.3:

$$Ka = \exp\left(\frac{6344}{273 + T}\right) \quad (3.3)$$

Onde,

$T$  = Temperatura do meio (°C).

Através destas equações as quantidades de amônia livre e amônio podem ser calculadas para distintos valores de pH e temperatura, como pode ser observado pela curva de equilíbrio apresentada na Figura 3.2



**Figura 3.2:** Curva de equilíbrio químico entre as formas de  $\text{NH}_4^+$  e  $\text{NH}_3$  à 25°C.

Como pode ser observado, para valores de pH abaixo de 7,0 praticamente só íons amônio estão presentes, sendo o residual de amônia livre muito baixo. Isto pode limitar a ação de alguns microrganismos, como as bactérias nitrificantes, visto que a amônia livre seria o real substrato utilizado pelos mesmos. Para valores mais altos de pH, a quantidade de amônia livre torna-se mais elevada, porém, deve-se lembrar que a amônia livre pode ainda ter um efeito inibitório sobre a ação destes microrganismos (WIESMANN, 1994).

Desta maneira, as formas nitrogenadas encontradas têm relevância pela sua utilização como nutriente e incorporação pela biota presente no meio aquático e ainda pelos diversos problemas ambientais ocasionados por estas.

A introdução de matéria orgânica em um corpo d'água é estabilizada pelas bactérias decompositoras, isto resulta, indiretamente, em um decréscimo da concentração de oxigênio no meio aquático. Conseqüentemente se esta matéria for lançada em altas cargas, o consumo de oxigênio no meio líquido será elevado, ocasionando eventuais mortes de micro e macrorganismos que dependem deste elemento para seu metabolismo.

A utilização das formas nitrogenadas como nutrientes promovem o fenômeno conhecido como eutrofização, que é o crescimento excessivo das plantas aquáticas a tais níveis que sejam causadas interferências relativas aos usos desejáveis do corpo d'água. Problemas com odores e aparência da água devido à decomposição das algas tornam a mesma esteticamente desagradável, causando subseqüentes interferências ao uso do curso d'água como suprimento e recreação. A redução de oxigênio dissolvido na água, por este fenômeno, pode acarretar na mortandade de organismos aquáticos em massa.

Sob condições quase anaeróbias, os íons amônio acumulam-se rapidamente, dificultando a já ineficiente oxidação do nitrito em nitrato. Altas concentrações de amônia total na água ocasionam uma elevação do pH sanguíneo dos organismos presentes. A concentração tolerável de amônio, não deve ultrapassar  $0,5 \text{ mgNH}_4^+/\text{L}$  para os organismos aquáticos e da amônia ( $\text{NH}_3$ ), não deve ser superior a  $0,6 \text{ mg NH}_3/\text{L}$  (PÁDUA, 2003).

A formação de produtos nocivos, como nitrito e nitrato, em corpos hídricos utilizados como fonte de água potável, podem ocasionar a metahemoglobinemia em recém nascidos, além de apresentarem efeitos carcinogênicos quando ingeridos pelo homem. O íon nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) apresenta toxicidade mais pronunciada de modo que sua concentração máxima deve ser de  $0,1 \text{ mg/L}$ . Os íons  $\text{NO}_3^-$ , não apresentam efeitos tão diversos aos organismos, quando em concentrações inferiores a  $10 \text{ mg/L}$ .

Tendo em vista tais contratempos, no Brasil a Resolução N° 20 do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) estabeleceu limites para tais formas na água, relacionados na Tabela 3.2. As classificação dos corpos d'água (Classe), mencionadas a seguir, estão apresentadas no Anexo 1.



**Tabela 3.2:** Limites ou condições de algumas formas nitrogenadas na água.

Composto	Concentração (mg N/L)	Classe
Amônia não ionizada(NH <sub>3</sub> )	0,02	1 e 2
Amônia não ionizada (NH <sub>3</sub> )	0,4	5 e 7
Nitrato (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	10,0	1, 2 e 3
Nitrito (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	1,0	1, 2 e 3

Ainda segundo esta resolução, efluentes de qualquer fonte poluidora deverão apresentar amônia sob forma não ionizada, em limite máximo de 5,0 mgN/L para que possam ser lançados, de forma direta ou indireta em corpos de água.

### 3.4. PROCESSOS DE REMOÇÃO DE NITROGÊNIO

O objetivo principal de um tratamento dos efluentes é corrigir as suas características indesejáveis, de tal maneira que o seu uso ou a sua disposição final possam ocorrer de acordo com a legislação ambiental. Diversos processos de tratamento podem ser aplicados para a remoção de nitrogênio de águas residuárias. Estes podem ser classificados em processos de remoção físico-química e processos de remoção biológica.

Muitos processos de remoção físico-química de nitrogênio vêm sendo fortemente descontinuados por razões econômicas, sendo substituídos por sistemas biológicos de remoção de nitrogênio (FARIAS, 2000; METCALF & EDDY, 1991). Alguns destes processos estão apresentados na Tabela 3.3, sem maiores detalhes, visto que este não é o intuito deste trabalho.

O tratamento biológico de efluentes, como o próprio nome indica, ocorre inteiramente por mecanismos biológicos que, de certo modo, reproduzem os processos naturais ocorrentes em um corpo d'água após o lançamento de despejos. Assim, em uma estação de tratamento os fenômenos básicos de depuração ocorrem sendo, porém, introduzidas estratégias visando uma melhor eficiência e controle.

**Tabela 3.3:** Tratamentos físico-químicos de remoção de nitrogênio.

Processos e Operações de Tratamento	Compostos Nitrogenados			Remoção de Nitrogênio Total do Processo (%)
	Nitrogênio Orgânico	$\text{NH}_3 - \text{NH}_4^+$	$\text{NO}_3^-$	
<b>Processos Químicos</b>				
Cloração ao Breakpoint	Incerto	90 – 100%	Sem efeito	80 – 95%
Coagulação Química	50 – 70%	Efeito insignificante	Efeito insignificante	20 – 30%
Adsorção de Carbono	30 – 50%	Efeito insignificante	Efeito insignificante	10 – 20%
Troca Iônica Seletiva para a Amônia	Insignificante	80 – 97%	Sem efeito	70 – 95%
Troca Iônica Seletiva para Nitrato	Efeito insignificante	Efeito insignificante	75 – 90%	70 – 90%
<b>Operações Físicas</b>				
Filtração	39 – 95% de N orgânico em suspensão	Efeito insignificante	Efeito insignificante	20 – 40%
Arraste com Ar	Sem efeito	60 – 95%	Sem efeito	50 – 90%
Eletrodíálise	100% de N orgânico em suspensão	30 – 50%	30 – 50%	40 – 50%
Osmose Reversa	60 – 90%	60 – 90%	60 – 90%	80 – 90%

**Fonte:** METCALF & EDDY (1991).

Segundo DURÁN (1999), o tratamento biológico a ser empregado deve ser selecionado levando-se em consideração as características do líquido a ser tratado, o nível de remoção requerido, o nível de complexidade da tecnologia a ser implementada e ainda o tipo e custo de instalação do processo.

O tratamento biológico de remoção de nitrogênio convencionalmente empregado para águas residuárias é realizado através da nitrificação e desnitrificação, onde primeiramente há uma oxidação da amônia a nitrato, via processo aeróbio, com posterior redução a nitrogênio gasoso, em meio anóxico (EPA, 1975). Este processo é comumente aplicado ao tratamento de efluentes com baixa carga nitrogenada, como, por

exemplo, para o tratamento de esgotos domésticos, fato este que torna o processo relativamente lento devido com baixa atividade dos microrganismos. Para efluentes com alta carga nitrogenada, são observadas dificuldades no dimensionamento e operação do sistema convencional.

Nas últimas décadas tem sido reportado o desenvolvimento de novos processos de remoção de nitrogênio, principalmente após a descoberta de novos ciclos bioquímicos do nitrogênio no metabolismo anaeróbico das proteobactérias oxidadoras de amônio e a oxidação anaeróbia de amônio por planctomicetos (SCHMIDT et al. 2003). Dentre os novos sistemas de remoção estão inclusos os processos que utilizam a oxidação parcial do amônio que vêm apresentando alguns aspectos considerados de grande interesse prático, como, por exemplo, a redução do consumo de oxigênio, recorrendo em custos menores de operação.

### **3.5. NITRIFICAÇÃO**

O estudo da nitrificação é um grande atrativo, pois esta é considerada a etapa limitante na remoção de nitrogênio em sistemas biológicos, devido à baixa velocidade de crescimento e grande sensibilidade a uma grande variedade de inibidores e, ainda, por sua importância no desenvolvimento de novos processos (ABREU, 2000; SCHMIDELL, 2003).

A nitrificação é, em síntese, o processo no qual ocorre a oxidação biológica da amônia tendo, como produto final, o nitrato. Esta oxidação ocorre em dois passos sequenciais: primeiramente a oxidação do amônio a nitrito e a oxidação do nitrito a nitrato.

A nitrificação é realizada principalmente por bactérias aeróbias, quimioautotróficas obrigatórias, utilizando desta forma  $\text{CO}_2$  como fonte de carbono e a oxidação de um substrato inorgânico como, por exemplo, a amônia a formas mineralizadas como fonte de energia (VON SPERLING, 1996). As reações envolvidas requerem a mediação de bactérias específicas divididas em dois grupos vinculado à

etapa do processo de nitrificação que realizam. No primeiro estágio, oxidação do amônio, participam as bactérias do gênero *Nitrosomonas*, *Nitrosococcus*, *Nitrospira*, *Nitrosolobus*, *Nitrosovibrio*, *Nitrosocystis* e *nitrosogloea*. No segundo estágio, oxidação do nitrito, estão envolvidas bactérias dos gêneros *Nitrobacter*, *Nitrococcus*, *Nitrospira* e *Nitrocystis*, *Bactoderma* e *Midroderma*. Sendo que a predominância de uma ou outra bactéria é pertinente às condições ambientais e nutricionais relacionadas ao meio (ABREU, 1994; HAGOPIAN & RILEY, 1998).

Embora a nitrificação seja realizada por bactérias autotróficas, há registros de que este processo ocorra também por ação de bactérias heterotróficas, como *Arlhrobacer* e *Thiosfera pantotropha*, que utilizam o carbono orgânico e oxidam a amônia a nitrato (BITTON, 1994 e JETTEN et al, 1997).

O metabolismo destas bactérias envolve processos químicos que ocorrem de forma simultânea na célula e podem ser divididos em ainda em duas categorias: catabolismo, que envolve reações realizadas para obtenção de energia e anabolismo, que considera reações referentes à formação de material celular (LA RIVIÉRE, 1980 <sup>2</sup> apud VON SPERLING, 1996).

Henze et al. 1997 e Madingan et al., 1997<sup>3</sup> <sup>3</sup> apud SCHMIDELL e REGINATTO (2005), apresentam as seguintes reações, relacionadas então, com a obtenção de energia:

⇒ Geração de nitritos principalmente por bactérias *Nitrosomonas*:  
(reação com hidroxilamina, NH<sub>2</sub>OH, como composto intermediário).



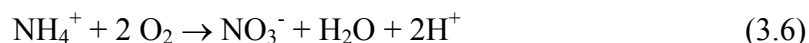
⇒ Oxidação dos nitritos a nitratos por ação principal do *Nitrobacter*:



<sup>2</sup> LA RIVIÉRE, J. W. M.. "Microbiology". Delf, IHE (Notas de Aula). 1980.

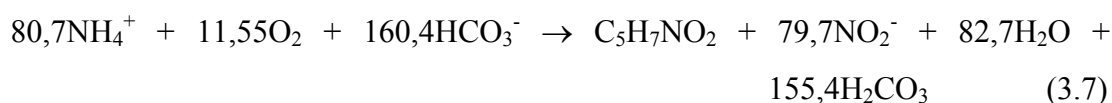
<sup>3</sup> MADINGAN, T. M.; MARTINGKO, J. M.; PARKER, J.. "Brock biology of microorganisms" Prentice Hall, Inc, 8º Ed. NY.

⇒ Reação global da oxidação do amônio a nitrato:

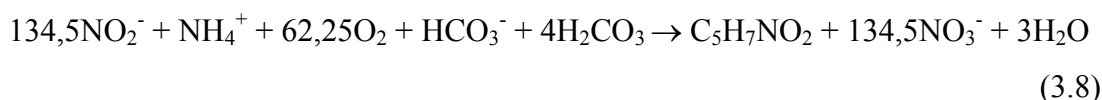


Segundo HENZE et al (1997) nas etapas de nitrificação as seguintes reações estão vinculadas ao crescimento celular:

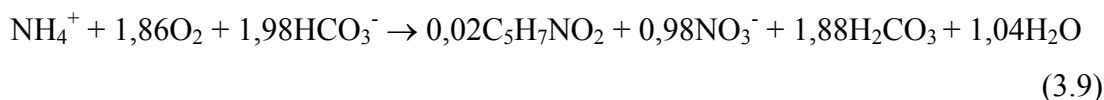
⇒ Reação referente ao crescimento celular durante a Nitritação.



⇒ Reação referente ao crescimento celular pela Nitratação.



⇒ Equação Global:



Segundo proposta de SCHMIDELL e REGINATTO (2005), a estequiometria da reação de nitrificação é válida para que sejam determinados parâmetros importantes que auxiliam no andamento do processo. Algumas considerações relativas a esta assertiva são relatadas abaixo:

⇒ Rendimento celular: Pode-se calcular o coeficiente de rendimento celular das *Nitrosomonas* partindo da relação estequiométrica entre o nitrogênio, utilizado como substrato, e o material celular ( $\text{C}_5\text{H}_7\text{NO}_2$ , PM=113g/gmol) mostrado na Equação 3.7. Neste caso, considera-se o nitrogênio sob forma amônio.

$$Y_{Nitrosomonas} = \frac{1mol \cdot 113gSSV / mol}{(80,7mol \cdot 14gN - NH_4^+ / mol)} = 0,10gSSV / gN - NH_4^+ \quad (3.10)$$

Através da Equação 3.9 é possível determinar o coeficiente de conversão do substrato para o conjunto de biomassa.

$$Y_{BiomassaTotal} = \frac{0,02mol \cdot 113gSSV / mol}{(1mol \cdot 14gN - NH_4^+ / mol)} = 0,16gSSV / gN - NH_4^+ \quad (3.11)$$

Desta forma, o coeficiente de produção de biomassa envolvendo as bactérias *Nitrobacter* pode ser considerado como a diferença entre os dois coeficientes anteriores:

$$Y_{Nitrobacter} = (0,16 - 0,10)gSSV / gN - NH_4^+ = 0,06gSSV / gN - NH_4^+ \quad (3.12)$$

⇒ Consumo de oxigênio: Pode-se calcular a demanda de oxigênio do sistema baseado na reação global proposta na Equação 3.6, ou ainda pela reação global segundo a Equação 3.9:

$$\frac{2mol \cdot 32gO_2 / mol}{(1mol \cdot 14gN - NH_4^+ / mol)} = 4,57gO_2 / gN - NH_4^+ \quad (3.13)$$

$$\frac{1,86mol \cdot 32gO_2 / mol}{(1mol \cdot 14gN - NH_4^+ / mol)} = 4,25gO_2 / gN - NH_4^+ \quad (3.14)$$

Estes valores diferem pelo fato de que o carbono inorgânico, utilizado pelos microrganismos para o crescimento, também atua como oxidante e desta forma, reduz o consumo de oxigênio.

### **3.6. FATORES QUE EXERCEM INFLUENCIA SOBRE AS BACTÉRIAS NITRIFICANTES**

Diversos fatores ambientais exercem influência sobre a atividade dos microrganismos nitrificante. Dentre os fatores mais significativos pode-se citar a temperatura, a concentração de oxigênio, o pH e a presença de inibidores (ORHON & ARTAN, 1994).

#### **3.6.1. Influência da Temperatura**

A temperatura interfere na cinética das reações, exercendo forte influência na velocidade de nitrificação, pois a temperatura altera a conformação estrutural de enzimas, promove interferência em funções básicas dos microrganismos e ainda afeta a difusão de substrato nas células (GRADY *et al*, 1980; SOARES, 1999).

A faixa de temperatura em que a nitrificação pode ocorrer está situada entre 5 e 50°C, sendo que a temperatura ótima apresenta valores entre 28 a 36°C (HENZE *et al*, 1997). Segundo GRUNDITZ E DALHAMMAR (2001), testes realizados utilizando culturas puras em tubos de ensaio apresentaram temperaturas ótimas mais específicas como 35°C para *Nitrosomonas* e 38°C para *Nitrobacter*.

Cabe ressaltar que existe grande dificuldade em se quantificar o efeito da temperatura na nitrificação devido a grandes faixas de variação verificadas em literatura (WATER POLLUTION CONTROL FEDERATION, 1991).

#### **3.6.2. Influência do pH**

O pH altera a carga dos sítios ativos das enzimas, ocasionando modificações nas suas estruturas e resultando na perda da especificidade. A grande maioria dos microrganismos apresenta faixa ótima de pH em torno da neutralidade (WATER POLLUTION CONTROL FEDERATION, 1997).

Muitos estudos revelam que o pH exerce influência significativa na nitrificação, justificada pela ação inibidora dos íons hidrogênio  $[H^+]$  e hidroxila  $[OH^-]$  na velocidade de crescimento dos microrganismos. À medida que as bactérias nitrificantes oxidam o amônio, verifica-se a produção de íons  $H^+$ , vide Equação 3.6, indicando uma elevação na acidez do sistema prejudicando, desta forma, a atividade nitrificante. Deste modo, para se evitar problemas no processo de nitrificação deve-se assegurar um pH estável, o que pode ser realizado mediante a adição de agentes tamponantes (Metcalf & Eddie, 1991).

É importante mencionar que a variação do pH, em conjunto com a temperatura, altera o equilíbrio químico entre as espécies amônio e amônia (verdadeiro substrato das oxidadoras de amônio), bem como, o equilíbrio entre o nitrito e ácido nitroso (substrato das oxidadoras de nitrito). Em relação ao ácido nitroso, o residual deste se encontra praticamente nulo no intervalo de pH entre 7 e 8. Já para valores abaixo de 7 e, especialmente, abaixo de 6, o ácido nitroso se encontra em porcentagens suficientes para causar uma inibição do sistema. A amônia livre, em baixos valores de pH, se encontra pouco disponível havendo uma limitação da ação das nitrificantes, porém, em valores elevados de pH, a amônia livre tem um caráter tóxico (SCHMIDELL & REGINATTO, 2005). A amônia livre em concentrações entre 10 – 150 mg/L começa a inibir o *Nitrosomonas* e para o *Nitrobacter* há inibição na faixa de 0,1 – 1,0 mg/L. O ácido nitroso inicia a inibição das nitrificantes em concentrações que variam de 0,22 – 2,8 mg/L (FERREIRA, 2000). Deste modo o próprio substrato, utilizado pelos microrganismos nitrificantes, pode ser um inibidor deste processo biológico.

Segundo ROS (1993), a faixa de pH em que a nitrificação ocorre situa-se entre 5 e 9, apresentando faixa ótima entre 6,5 e 8,6. Alguns autores afirmam ainda que o pH ótimo para este processo gira em torno de 7,2 a 8,5 (BARNES & BLISS, 1983). De acordo com EPA (1975), valores de pH abaixo de 7,0 e acima de 9,8 reduzem a velocidade de nitrificação em cerca de 50%.



### 3.6.3 Efeito do Oxigênio Dissolvido

O oxigênio dissolvido no reator é um pré-requisito indispensável para a ocorrência da nitrificação, desta forma, a nitrificação diminui consideravelmente no instante em que o oxigênio se reduz abaixo de um nível crítico apresentando, porém, um reinício muito rápido tão logo o oxigênio dissolvido seja elevado.

O valor crítico de oxigênio dissolvido, abaixo do qual a nitrificação é reduzida significativamente, é encontrado na literatura em uma faixa ampla. Segundo VON SPERLING (1996), a recomendação é de que, a concentração de oxigênio dissolvido, não seja reduzida a valores menores de 0,5 mg/L. BARNES & BLISS (1993) apresentam que o valor crítico de oxigênio em torno de 0,2 mg/L. Em contrapartida, encontra-se descrito pela EPA (1975), que o valor mínimo de oxigênio dissolvido se acha em torno de 2,0 mg/L para que sejam evitados problemas com os picos de amônia no efluente.

ORHON & ARTAN (1994) e ABREU (1994), sugerem que possam ocorrer diferentes impactos do oxigênio em baixas concentrações dissolvido sob a formação de nitrito e nitrato. Nestes casos pode ocorrer acúmulo de nitrito, uma vez que as oxidadoras de nitrito apresentam maior sensibilidade a baixas concentrações de oxigênio (0,5 mg/L) do que o *Nitrosomonas*. Recomenda-se, em casos onde se deseja a nitrificação completa, que se mantenha a concentração de oxigênio dissolvido em valores elevados de forma a garantir que sejam atingidos níveis desejados até mesmo nos pontos de difícil acesso dentro do reator.

### 3.6.4 Influência de Inibidores

A presença de certos compostos, dependendo de sua natureza e quantidade, pode distorcer o metabolismo de microrganismos provocando inibição, parcial ou total, de sua atividade (ROS, 1993) ou ainda ocasionar interferências nas reações oxidativas (FERREIRA, 2000). Desta forma, compostos tóxicos introduzidos nos sistemas biológicos, podem ocasionar a diminuição da capacidade metabólica da biomassa e

conseqüente redução de eficiência, sem que estejam relacionadas diminuições da carga orgânica aplicada ao processo (FERNANDES *et al*, 2001).

Os microrganismos nitrificantes são suscetíveis a uma série de inibidores orgânicos e inorgânicos. Entre as substâncias inorgânicas, estão os metais pesados que, em concentrações da ordem de 10 a 20 mg/L, podem ser tolerados devido a baixa concentração iônica presente na faixa de pH entre 7,5 e 8,0, comuns para este tipo de processo. Os compostos inorgânicos potencialmente inibidores são: zinco, cianetos, percloratos, mercúrio, cromo, níquel, prata, cobalto, azida de sódio, hidrazina, fluoretos, chumbo, entre outros (FERREIRA, 2000).

BENMOUSSA *et al* (1986), reportaram a inibição da nitrificação, em testes batelada, por compostos orgânicos. Segundo estes autores o fenol pode inibir totalmente a nitrificação em culturas nitrificantes, porém este efeito pode não ser verificado em culturas mistas, devido à degradação deste por alguns microrganismos.

Segundo FERREIRA (2000) outros compostos orgânicos ainda podem ser citados como inibidores, conforme apresentado na Tabela 3.5. Entretanto deve-se lembrar que as concentrações mencionadas podem sofrer variações em decorrência da aclimatação.

**Tabela 3.4:** Compostos orgânicos inibidores da nitrificação.

Composto	Concentração que gera 50% de inibição (mg/L)
Acetona	2.000
Dissulfeto de Carbono	38
Clorofórmio	18
Etanol	2.400
Fenol	5,6
Etileno diamina	17
Hexametileno diamina	85
Anilina	< 1
Monoetanolamina	< 200

**Fonte:** FERREIRA (2000).

### 3.7. CINÉTICA DE NITRIFICAÇÃO

O estudo da cinética de um determinado processo permite a obtenção de uma relação entre a velocidade de reação frente às diferentes condições particulares do meio em que esta ocorre. No caso de sistemas microbianos, devido a sua complexidade, é impraticável que se caracterize todos os fenômenos envolvidos, contudo, pode-se efetuar estudos cinéticos considerando-se apenas as reações de maior importância de modo a escolher condições que visem uma boa eficiência do sistema em questão.

Para que se possam representar os principais processos envolvidos e, utilizá-los no campo da engenharia, faz-se utilização de modelos matemáticos que nada mais são que um conjunto de equações que permitem o estudo dos fenômenos ocorridos de modo satisfatório (FURIGO & PARK, 2005). Em se tratando de processos biológicos é de grande interesse que se possa obter uma relação entre a atividade microbiana e a concentração do substrato limitante de forma que se possam avaliar parâmetros utilizados em projetos de sistemas biológicos e no seu controle otimizando as principais reações envolvidas.

Diversos modelos matemáticos foram desenvolvidos, nas últimas décadas, para representar as variações de remoção de determinados substratos em sistemas biológicos sob diferentes condições de operação (HUANG *et al*, 2001). Entretanto, inúmeros pesquisadores relatam o modelo de Monod como sendo a principal relação entre os parâmetros cinéticos envolvidos em processo biológicos. (VOLSKAY *et al*, 1988; SCHMIDELL, 2001).

Segundo BAILEY & OLLIS (1986), Monod demonstrou que a velocidade de crescimento dos microrganismos é dada em função da concentração de microrganismos e de um único substrato limitante correlacionando os dados experimentais de forma satisfatória. Este modelo é expresso pela Equação 3.15 e o seu perfil cinético demonstrado na Figura 3.3.

$$\mu_X = \frac{\mu_{m\acute{a}x} \cdot S}{K_S + S} \quad (3.15)$$

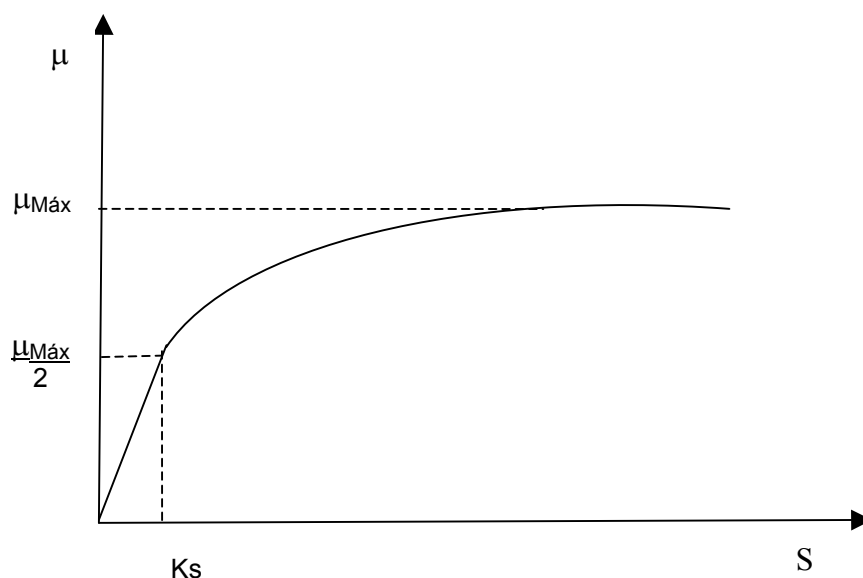
Onde,

$\mu_X$  = Velocidade específica de crescimento ( $d^{-1}$ )

$\mu_{m\acute{a}x}$  = Máxima velocidade específica de crescimento ( $d^{-1}$ )

$S$  = Concentração de substrato ( $mgS.L^{-1}$ )

$K_S$  = Constante de saturação, que representa a concentração de substrato na qual  $\mu_X$  atinge metade de seu valor máximo ( $mgS.L^{-1}$ )

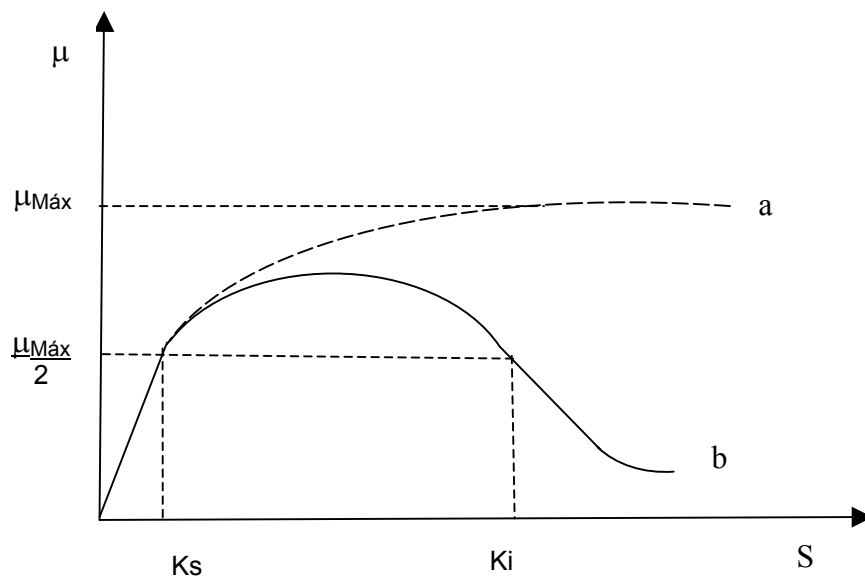


**Figura 3.3:** Representação gráfica do modelo de Monod.

Neste modelo, para concentrações elevadas de substrato, a razão  $S/(K_S+S)$ , se aproxima da unidade e a velocidade de crescimento torna-se independente da concentração de substrato. No entanto, quando esta concentração é baixa,  $S \ll K_S$ , a velocidade torna-se proporcional à  $S$ , tornando-se uma cinética de primeira ordem (BAILEY & OLLIS, 1986).

O modelo apresentado por Monod apresenta uma forma relativamente simples de relação entre o substrato e o comportamento de microrganismos, contudo, este não leva em consideração o possível efeito inibitório de alguns compostos sobre o crescimento microbiano, o que é uma situação comum na prática. Quando em altas concentrações, o substrato pode provocar um efeito contrário à velocidade específica de

crescimento, fazendo com que esta não atinja seu máximo valor, como mostra a Figura 3.4 (SCHMIDELL, 2001).



**Figura 3.4:** Cinéticas (a) sem inibição e (b) inibidas por S.

Fonte: SCHMIDELL, 2001.

Outros modelos matemáticos desenvolvidos e que descrevem o efeito inibitório são, em geral, adaptações de equações para reações enzimáticas inibidas por substrato (LUONG, 1986; VOLSKAY *et al*, 1988; TANYOLAÇ *et al*, 2000).

Um modelo freqüentemente utilizado neste sentido foi proposto por ANDREWS (1968) e propõe que o efeito do substrato sobre a velocidade específica de crescimento pode ser regido pela seguinte expressão, representada através da Equação 3.16:

$$\mu_x = \frac{\mu_{máx} \cdot S}{S + K_s + S^2 / K_I} \quad (3.16)$$

Onde:

$K_I$  = Constante de inibição ( $\text{mgS} \cdot \text{L}^{-1}$ )

Esta Equação é baseada no modelo de inibição de enzimas proposto por Haldane, como a analogia feita entre as expressões de Michaelis-Menten e Monod. Pode-se notar que a Equação 3.18 é reduzida ao modelo de Monod quando  $K_I$  tende ao infinito.

Neste modelo a definição do parâmetro  $\mu_{\max}$  refere-se ao valor máximo de velocidade de crescimento na ausência de inibição, o que implica em que, quanto maior o nível de inibição, mais será super estimado o seu valor. Assim, o autor propõe uma correção deste valor pela Equação 3.17, obtida derivando-se a Equação 3.18 e igualando-se esta a zero.

$$\mu_{\max} = \frac{\mu \cdot S}{1 + 2 \cdot (K_S / K_I)^{0,5}} \quad (3.17)$$

Segundo ANDREWS (1968), a concentração de substrato, quando se atinge  $\mu_{\max}$  na presença de inibidores, pode ser encontrada através da Equação 3.18:

$$S = (K_S \cdot K_I)^{0,5} \quad (3.18)$$

Sugeridos por Edwards, outras expressões advindas de inibições enzimáticas (LUONG, 1986; TANYOLAÇ *et al*, 2000; CARRERA *et al*, 2004) são descritas nas Equações 3.19 e 3.20 a seguir:

$$\mu_X = \frac{\mu_{\max} \cdot S \cdot (1 + S / K_S)}{S + K_S + S^2 / K_I} \quad (3.19)$$

$$\mu_X = \frac{\mu_{\max} \cdot S \cdot e^{S / K_I}}{S + K_S} \quad (3.20)$$

LUONG (1986) propôs o modelo apresentado pela Equação 3.21 sob o intuito de descrever o efeito inibitório do substrato Butanol no crescimento de *Cândida utilis*.

$$\mu_x = \frac{\mu_{máx} \cdot S}{S + K_s} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{S}{Sm} \right) \right]^{n_L} \quad (3.21)$$

Onde,

$n_L$  = Coeficiente de Luong;

$Sm$  = Concentração máxima de substrato acima da qual o crescimento é completamente inibido (mgS/L).

Ainda pode-se citar a expressão de Jerusalinsky aplicada para digestão anaeróbia relativa à inibição não competitiva, descrita na Equação 3.22 (MORVAI, 1992).

$$\mu_x = \frac{\mu_{máx} \cdot S}{S + K_s} \cdot \frac{K_i}{S + K_i} \quad (3.22)$$

Os modelos apresentados consideram a inibição provocada por um único substrato, porém, encontram-se outros modelos, descritos na literatura, que representam o fenômeno de inibição de forma mais complexa. Obviamente a escolha do modelo se dá pelo que venha a traduzir melhor os objetivos de estudo da cinética em questão.

### 3.8. DETERMINAÇÃO RESPIROMÉTRICA DA ATIVIDADE ESPECÍFICA

Em se tratando de processos de nitrificação, a prescrição de parâmetros referentes à atividade dos microrganismos envolvidos pode ser realizada mediante determinações relacionadas a variações do consumo de substrato ou formação de produtos e, ainda, através de fatores referentes ao meio que estejam ligados às reações envolvidas, como variação do oxigênio dissolvido, pH ou alcalinidade (ABREU, 2000).

Em processos biológicos, alterações na concentração de oxigênio dissolvido estão relacionadas a mudanças relativas à respiração do lodo e ao consumo do substrato e, desta forma, podem prescrever informações essenciais sobre o sistema (ROS, 1993; IAWQ, 1998). Neste sentido, a respirometria que é, em síntese, uma técnica rápida e simples, utilizada para medidas e interpretações da velocidade de consumo biológico de oxigênio, vem sendo amplamente utilizada (IAWQ, 1998).

A respirometria teve seu início em 1880, utilizada por Haldane, na determinação dos gases no sangue, sendo o primeiro respirômetro desenvolvido para medições da demanda de oxigênio de águas residuárias em 1890. Em 1926, baseado no método desenvolvido por Haldane, foi desenvolvido o respirômetro de Warburg, que tinha como finalidade a medida da DBO e avaliação da toxicidade em sistemas aeróbios e anaeróbios. Nos processos de tratamento de esgotos, a aplicação regular da respirometria teve seu início na década de 30, sendo então realizados esforços no sentido de aprimorar esta técnica de modo a facilitar a interpretação dos dados obtidos e torná-la cada vez menos laboriosa (LEITE E MORITA, 1999).

Uma variedade de instrumentos respirométricos foi criada para se realizar medidas do consumo de oxigênio sob condições controladas. Estes instrumentos são chamados de respirômetros e são constituídos basicamente por um sistema contendo um recipiente no qual é introduzida uma suspensão celular e onde ocorre a respiração (com controle de temperatura, agitação e aeração) e ainda instrumentos que permitem a medida do oxigênio consumido. Segundo ROS (1993) podem ser classificados em dois grupos de acordo com suas características:

- Respirômetros Fechados: subdivididos em manométricos (o oxigênio consumido é medido pela diferença de pressão no sistema), volumétricos (oxigênio consumido é registrado por meio de uma célula eletrolítica que libera oxigênio quando a pressão interna é reduzida mantendo a pressão do sistema constante) ou combinados (o consumo de oxigênio é medido pela diferença de pressão a diferentes volumes e pressões no sistema);
- Respirômetros Abertos: subdivididos em contínuos ou descontínuos de acordo com a continuidade da medição realizada.

Em geral, cada laboratório adota sua própria configuração de acordo com a disponibilidade operacional existente ou, muitas vezes, de forma a representar melhor as condições impostas à biomassa nos processos.



Os sistemas que empregam a medida da concentração de oxigênio dissolvido na fase líquida possuem grande facilidade operacional envolvida. Atualmente é empregado amplamente o uso de eletrodos de membrana que permitem a leitura do oxigênio dissolvido de forma muito simplificada. Estes eletrodos estão freqüentemente acoplados á registradores de dados permitindo uma maior precisão dos resultados e, ainda, tornando o teste respirométrico mais ágil.

Imaginando-se um sistema respirométrico formado por um biorreator idealmente misturado, aberto, contendo biomassa, com entrada e saída, o balanço de massa para o oxigênio, na fase líquida, para este respirômetro pode ser descrito por:

$$\frac{d(V \cdot C_{O_2})}{dt} = Q_E \cdot C_{O_{2E}} - Q_S \cdot C_{O_2} + V \cdot K_L a \cdot (C^* - C_{O_2}) - V \cdot r_0 \quad (3.23)$$

Onde,

$V$  = Volume útil do reator;

$C_{O_2}$  = Concentração de oxigênio dissolvido na fase líquida;

$C_{O_{2E}}$  = Concentração de oxigênio dissolvido na fase líquida na entrada;

$C^*$  = Concentração de oxigênio dissolvido na saturação;

$Q_E$  = Vazão de líquido entrando no sistema;

$Q_S$  = Vazão de líquido saindo no sistema;

$r_0$  = Velocidade de respiração ou consumo de oxigênio;

Segundo Leite e Morita (1999) ensaios respirométricos são amplamente realizados empregando-se sistemas abertos. Estes ensaios têm como vantagens a rápida execução e a possibilidade de se fazer uso de baixas quantidades de biomassa. Desta forma, considerando ensaios em batelada, a volume constante, o termo de entrada e saída podem ser dispensados, portanto:

$$\frac{dC_{O_2}}{dt} = K_L a \cdot (C^* - C_{O_2}) - r_0 \quad (3.24)$$

Através de respiração, o oxigênio dissolvido que se encontra disponível no biorreator vai sendo consumido pela biomassa. A velocidade de respiração da biomassa no líquido pode ser ainda expressa pela Equação 3.25.

$$r_0 = Q_{O_2} X \quad (3.25)$$

Onde,

$Q_{O_2} X$  = velocidade específica de respiração (mgO<sub>2</sub>/g cel. h);

$X$  = concentração celular (g cel./L)

Desta forma, obtemos a seguinte Equação:

$$\frac{dC_{O_2}}{dt} = K_L a \cdot (C^* - C_{O_2}) - Q_{O_2} X \quad (3.26)$$

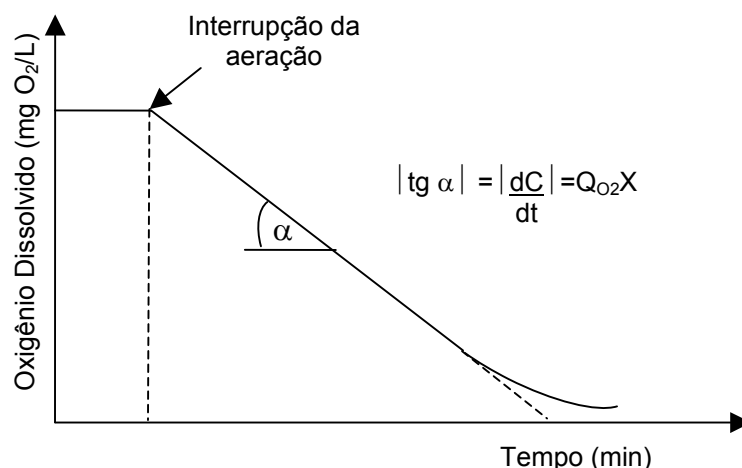
Ao interromper-se a aeração, se a transferência de oxigênio para o líquido for nula, ou praticamente nula, ( $K_L a = 0$ ), temos:

$$\frac{dC_{O_2}}{dt} = -Q_{O_2} X \quad (3.27)$$

Assim, o decaimento da concentração de oxigênio dissolvido, registrada ao longo do período em que não se promova aeração, é devido somente ao consumo biológico. Nestes casos, se o valor de  $Q_{O_2} X$  puder ser considerado constante, durante um certo intervalo de tempo (sem que se tenha limitação de oxigênio dissolvido), a Equação 3.27 pode ser integrada resultando em:

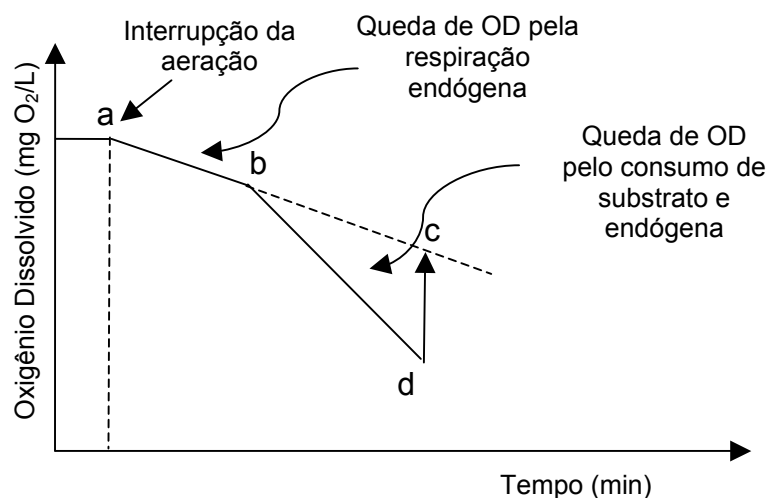
$$C_{O_2} - C_{O_{2i}} = -Q_{O_2} X \cdot t \quad (3.28)$$

Deste modo espera-se que haja uma relação linear entre a concentração de oxigênio dissolvido ( $C$ ) e o tempo ( $t$ ), conforme indicado na Figura 3.5.



**Figura 3.5:** Relação entre OD e tempo.

A biomassa é constituída por organismos que utilizam oxigênio e substrato em seu metabolismo de forma que, quando o meio em que esta biomassa se encontra presente não dispor de uma quantidade de substrato suficiente para a síntese celular, os microrganismos entram em uma fase dita como endógena. Nesta fase há um decaimento celular que, através de um processo de hidrólise, disponibilizam material que acaba por servir de alimento de modo que se pode observar um consumo de oxigênio para a manutenção das células ainda existentes (SPANJERS *et al.*, 1998). Deste modo, supondo que, num primeiro instante, a biomassa estivesse em um meio ausente de substrato, ao interromper-se a aeração do sistema, pode-se medir o consumo de oxigênio somente devido à manutenção celular (endógena). E, supondo ainda, que após um breve período, fosse adicionado uma fonte externa de substrato, se fosse continuada a medida do consumo de oxigênio, poderia se obter uma segunda queda relativa ao consumo de substrato mais a endógena, como mostra a Figura 3.6.



**Figura 3.6:** Efeito da adição de substrato na respiração do lodo.

(Fonte: Adaptação de ROS, 1993).

Assim, obtendo-se a inclinação da segunda queda e, subtraindo desta, o valor da inclinação da primeira queda, teríamos resultante o  $Q_{O_2X}$  relativo, somente, a respiração devido ao consumo de substrato.

Uma característica observada na execução dos ensaios respirométricos é referente à relação entre substrato e biomassa utilizada. Em ensaios batelada,  $S_0$  denota a concentração inicial de substrato e representa a fonte energética requerida na biossíntese das células e outros propósitos. Já a expressão  $X_0$  significa a fonte que utiliza o substrato, no caso a biomassa inicial presente na suspensão. A relação entre essas variáveis reflete no nível inicial de energia para estes ensaios e que esta relação atua diretamente sob a forma de metabolismo microbiano (LIU, 1996). Segundo GRADY *et al* (1995), esta relação tem influência direta sobre o significado de parâmetros cinéticos obtidos e desta forma a escolha inadequada, pode resultar em reflexões incorretas sobre a cultura original dos microrganismos envolvidos.

Quando são utilizadas baixas relações  $S_0/X_0$  o substrato é rapidamente assimilado o que torna o experimento breve. Para estas relações o crescimento biomassa não se torna significativo, mantendo-se o estado fisiológico do ambiente qual foi coletada a biomassa. Já para relações mais elevadas de  $S_0/X_0$ , pode-se observar de

modo mais amplo o consumo do substrato enriquecendo a cinética, porém devido a consideração relativa ao crescimento de microrganismos pode tornar mais complexa a interpretação destes ensaios (CHUDоба *et al.*, 1992<sup>4</sup> apud FERREIRA, 2002).

Cabe ressaltar ainda a importância da relação  $S_0/X_0$  como um parâmetro cinético encontrado através de ensaios respirométricos tendo-se em vista a frequentemente utilização desta em processos de dimensionamento.

---

<sup>4</sup> CHUDоба, P., CAPDEVILLE, B. E CHUDоба, J. (1992). "Explanation of biological meaning of the  $S_0/X_0$  ratio in batch cultivation." *Water Science & Technology*, **26**(3-4), 743-751.

## **4. METODOLOGIA**

### **4.1. INÓCULO UTILIZADO EM ENSAIOS DE ATIVIDADE NITRIFICANTE**

#### **4.1.1. Preparo e Enriquecimento da cultura utilizada**

Com o intuito de manter uma flora de microrganismos ativa e mais uniforme durante todo o estudo, foi mantido no laboratório um reator somente como fonte de microrganismos para os ensaios de atividade nitrificante. Como inóculo deste reator utilizou-se uma cultura mista proveniente do sistema de tratamento de esgotos por lodos ativados da Companhia de Saneamento do Estado de Santa Catarina (CASAN) de Florianópolis.

A cultura foi acondicionada no reator no qual diluiu-se a mesma com água e meio sintético na proporção 10:8:2, completando desta forma 20 L. O reator foi submetido sob aeração constante por meio de injeção de ar comprimido e dispersores, sendo mantido a temperatura ambiente. Posteriormente optou-se pelo acoplamento de um termostato que permitiu a manutenção da temperatura a 35°C. O pH do meio foi mantido em valores próximos de 7,5 através de ajustes com solução de NaOH ou HCl, favorecendo desta forma o crescimento das bactérias nitrificantes.

A caracterização da fase inicial do reator foi realizada em função da determinação dos sólidos suspensos totais (SST), sólidos suspensos voláteis (SSV) e do ensaio de atividade nitrificante. O procedimento das determinações mencionadas acima, bem como do ensaio de atividade nitrificante estão descritos nos itens 4.2 e 4.5 respectivamente.

A alimentação do reator foi realizada diariamente em sistema batelada alimentada com TRH de 10 dias. Para tanto, a aeração era suspensa, aguardava-se ocorrer uma sedimentação do lodo e então removia-se 2L do sobrenadante. Este volume retirado era repostado pelo mesmo volume (2L) de meio de cultura autotrófico sintético. A

Figura 4.1 apresenta o procedimento mencionado de alimentação deste reator. O volume a ser removido diariamente foi calculado segundo a Equação 4.1, apresentada abaixo.

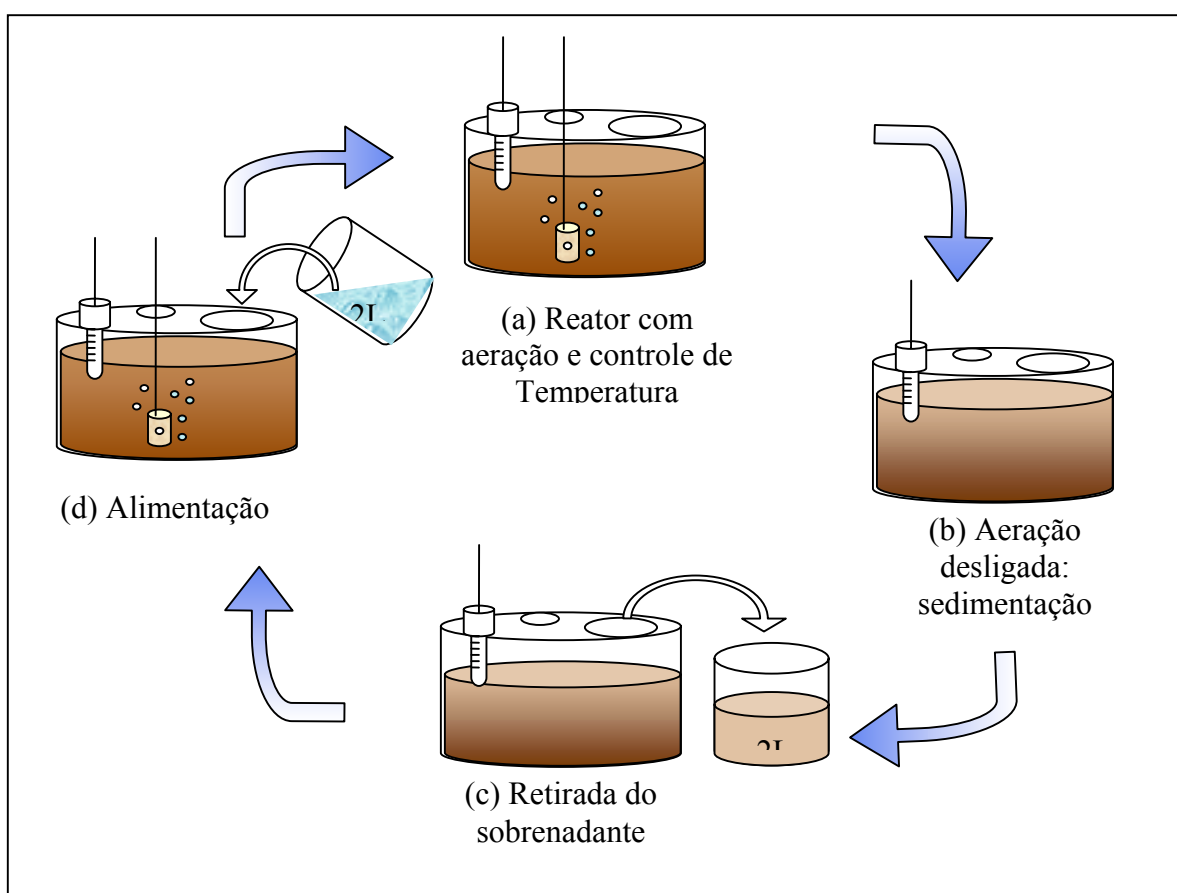
$$TRH = \frac{V}{V_{SR}} \quad (4.1)$$

Onde,

$TRH$  = Tempo de retenção hidráulica (d);

$V$  = Volume útil do reator (L);

$V_{SR}$  = Volume retirado por dia do reator (sobrenadante de saída) (L/d).



**Figura 4.1:** Seqüência utilizada na alimentação do reator.

Visando a utilização da biomassa nitrificante, o reator foi alimentado com solução autotrófica, segundo o meio proposto por Campos *et al* (1999). A composição utilizada no preparo do meio está apresentada nas Tabelas 4.1 a 4.3, onde a relação entre

as soluções A e B foi de 8:1. O preparo deste meio foi realizado semanalmente e mantido a temperatura ambiente.

**Tabela 4.1:** Composição de nutrientes do meio nitrificante sintético (Solução A)

Componentes	Concentração (g L <sup>-1</sup> )
NH <sub>4</sub> Cl	0,956
(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1,178
MgSO <sub>4</sub>	0,123
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	0,250
NaCl	1
Solução de micronutrientes	0,7 mL.L <sup>-1</sup>

Fonte: CAMPOS *et al.* (1999).

**Tabela 4.2:** Composição do meio nitrificante sintético (Solução B).

Componentes	Concentração (g L <sup>-1</sup> )
NaHCO <sub>3</sub>	40

**Tabela 4.3:** Composição da solução de micronutrientes.

Componentes	Concentração (g L <sup>-1</sup> )
EDTA	50
ZnSO <sub>4</sub> .7 H <sub>2</sub> O	22
CaCl <sub>2</sub>	5,54
MnCl <sub>2</sub> . 4 H <sub>2</sub> O	5,06
FeSO <sub>4</sub> . 7 H <sub>2</sub> O	4,99
(NH <sub>4</sub> ) <sub>6</sub> Mo <sub>7</sub> O <sub>24</sub> . 4 H <sub>2</sub> O	1,1
CuSO <sub>4</sub> . 5 H <sub>2</sub> O	1,57
CoCl <sub>2</sub> . 6 H <sub>2</sub> O	1,61

Fonte: CAMPOS *et al.* (1999), o pH foi ajustado em 6,0 com KOH.

Para o enriquecimento da biomassa desejada, realizou-se uma progressão na carga aplicada ao reator, partindo-se do meio elaborado, com aumento de 32,21% da



carga a cada semana. A Tabela 4.4 relaciona a carga de nitrogênio, conferida pela alimentação, de acordo com o uso proporcional entre as soluções preparadas e das semanas em que foram realizadas. Assim, pela composição do meio e proporções utilizadas na alimentação (1 L da solução (A+B) + 1 L H<sub>2</sub>O destilada), para a primeira semana, a carga de nitrogênio aplicada ao sistema, de acordo com a Equação 4.2, foi:

$$q = \frac{(C_{N-NH_4^+})_E}{TRH} \quad (4.2)$$

Onde,

$q$  = Carga (mg N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>/L.d);

$(C_{N-NH_4^+})_E$  = Concentração de nitrogênio na forma amoniacal introduzido ao reator (mg N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>/L);

$$q = 286,23 \text{ mg NH}_4^+ / \text{L} \cdot \frac{2 \text{ L} / \text{d}}{20 \text{ L}} = 28,62 \text{ mg NH}_4^+ / \text{L} \cdot \text{d} = 22,26 \text{ mg N} - \text{NH}_4^+ / \text{L} \cdot \text{d} \quad (4.3)$$

**Tabela 4.4:** Progressão de carga referente à aclimação do lodo utilizado.

Semana	Solução (A+B) (L)	Água (L)	Carga (mg N – NH <sub>4</sub> / L*d)
1	1	1	22,26
2	1,320	0,680	29,45
3 e 4	1,746	0,254	38,96
5	2	0	51,55

Na 6ª semana preparou-se a solução A e B com o dobro da composição mencionada na Tabela 4.1 e 4.2, e utilizando a progressão entre as solução (A+B) e água indicadas para primeiras 5 semanas alimentou-se o reator até a 10ª semana. Após este período manteve-se a carga e proporções, utilizadas na alimentação, constantes.

#### 4.1.2. Monitoramento do Reator

O acompanhamento do reator foi realizado mediante análises físico-químicas da alimentação e de saída do reator. Também foi determinada a concentração celular

presente no reator durante o período operacional. As análises efetuadas, bem como a frequência em que as mesmas foram realizadas, estão apresentadas na Tabela 4.5.

**Tabela 4.5:** Frequência do acompanhamento analítico do reator.

Análise	Frequência
pH	Diariamente
$\text{NH}_4^+$ , $\text{NO}_3^-$	Diariamente
$\text{NO}_2^-$	3 vezes por semana
SST/SSV	Em períodos pré-estabelecidos
Ensaio Cinético	Inóculo e de acordo com os objetivos dos ensaios

A caracterização físico-química da alimentação preparada foi realizada mediante a análise de  $\text{NH}_4^+$  e pH, de acordo com a metodologia apresentada no item 4.4. Através da filtração do sobrenadante, removido do reator, realizaram-se as análises que quantificaram as formas nitrogenadas ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_2^-$  e  $\text{NO}_3^-$ ) e pH na saída do reator. Os resultados obtidos destas análises estão apresentados no Apêndice 1.

Com os resultados obtidos para as formas nitrogenadas de entrada e saída, foram ainda calculadas a eficiência de conversão de  $\text{N-NH}_4^+$  à  $\text{N-NO}_3^-$  no reator, dado pela Equação 4.4.

$$\% \text{ Conversão} = \frac{1 - [(C_{\text{N-NH}_4^+})_E (C_{\text{N-NO}_3^-})_S]}{(C_{\text{N-NH}_4^+})_E} \cdot 100 \quad (4.4)$$

Onde,

$(C_{\text{N-NO}_3^-})_S$  = Concentração de nitrato na saída do reator (mg  $\text{N-NO}_3^-/\text{L}$ ).

Poderia-se calcular a eficiência da nitrificação, porém, visto que a forma de  $\text{N-NO}_2^-$  não era frequentemente encontrada na saída do reator, a equação 4.4 pode representar a contento a nitrificação ocorrida no reator.

## 4.2. ENSAIO DE ATIVIDADE NITRIFICANTE ESPECÍFICA

A determinação da atividade nitrificante do lodo foi realizada através de ensaios de respirometria, os quais consistem na determinação da cinética do consumo de oxigênio decorrentes do uso de substrato por uma dada quantidade de biomassa. Para a execução da técnica respirométrica, desenvolvida neste trabalho, utilizou-se um erlenmeyer de vidro (250 mL) como biorreator. Para tanto, foram feitas algumas adaptações nesse frasco, como a implantação de duas novas aberturas laterais, visando o acoplamento de sensores de pH e oxigênio dissolvido e a confecção de três chicanas na base com o intuito de se evitar vórtices no sistema. O sensor utilizado para medida de oxigênio dissolvido no meio foi um eletrodo galvânico (Oxi 340/SET – WTW Germany) e o pHmetro da marca QUIMIS.

O sistema utilizado nos respectivos ensaios está apresentado na Figura 4.2. Utilizou-se um agitador magnético com aquecimento da marca (Heidolph MR3001 – Germany) através do qual pode-se manter o sistema devidamente homogeneizado e à temperatura constante. A aeração do meio foi feita pelo uso de um dispersor conectado a um sistema de ar comprimido.

Foram preparadas soluções de NaOH 2,5%(p/v) e HCl 2,5%(v/v) utilizadas para a correção de pH do meio nos ensaios. Foram preparadas ainda soluções de  $\text{NH}_4\text{Cl}$  com concentrações variando entre 50 e 10.000 mg N- $\text{NH}_4/\text{L}$ , a fim de facilitar a distribuição dos volumes utilizado nos pulsos dados durante o ensaio.



**Figura 4.2:** Sistema operacional utilizado em ensaios de respirometria.

O procedimento aplicado para a determinação da cinética obedeceu as seguintes operações:

⇒ Coletava-se uma amostra da suspensão do reator, filtrava-se a mesma e suspendiam-se os sólidos em água. Esse procedimento era repetido até que as concentrações de amônia e de nitrito fossem nulas, de modo a se eliminar a influência dessas formas na determinação da respiração endógena. A seguir filtrava-se novamente a amostra e ressuspendiam-se os sólidos em uma solução nutriente, composta pelo meio proposto por Campos *et al* (1999), porém, sem adição dos compostos com amônio. Se necessário eram realizadas diluições da suspensão, com este meio nutriente, a fim de se encontrar a concentração celular previamente desejada nos ensaios.

⇒ Preparada a suspensão de células, fez-se a determinação da sua concentração celular (SST ou SSV, conforme descrito no item 4.6.4). A seguir, transferia-se 300 mL da suspensão para o biorreator, iniciou-se a aeração do sistema e fez-se ajustes no pH (7,5), temperatura (35°C) e rotação do agitador magnético (300 rpm).

⇒ Estabelecidas as condições desejadas de temperatura e oxigênio dissolvido no meio (próximo à saturação), interrompeu-se a aeração e anotou-se a queda da concentração de oxigênio dissolvido em função do tempo. Quando a concentração de oxigênio alcançou valores próximos a 30% da concentração de saturação o sistema foi colocado novamente sob aeração. Desta maneira determinou-se a respiração endógena referente à biomassa analisada (vide Equação 3.28).

⇒ Aguardou-se até que as condições do meio fossem novamente restabelecidas e utilizando uma solução contendo cloreto de amônio, foi dado um pulso no meio de forma a obter-se uma concentração final de aproximadamente  $5\text{mgN-NH}_4^+/\text{L}$  no biorreator. Homogeneizou-se o meio, removeu-se o mesmo volume inserido através do pulso de suspensão e filtrou-se esta alíquota. Logo após a filtração, o material celular foi retornado ao erlenmeyer. Assim, possibilitou-se a manutenção volumétrica e da concentração celular do meio.

⇒ Prontamente ocorrida a devolução das células, a aeração foi suspensa e iniciou-se a leitura da queda de oxigênio dissolvido em intervalos de tempo que variaram de acordo com a atividade da suspensão em questão. Novamente não foi permitido que a concentração de OD atingisse valor menor que 30% da concentração de saturação.

⇒ A amostra retirada do erlenmeyer era então analisada para que se confirmasse a concentração de amônio resultante no biorreator. Eventualmente também foram realizadas determinações da concentração de nitrito do meio, a fim de verificar se esta não se encontrava alta o suficiente para inibir a atividade da biomassa.

⇒ O sistema foi então mantido sob aeração e realizaram-se posteriores pulsos com concentrações maiores de amônio repetindo-se os passos descritos acima. As

concentrações subsequentes de amônio no meio variaram de acordo com a biomassa utilizada e com a inibição ocasionada pela mesma.

Para cada pulso imposto ao meio, plotou-se os valores do oxigênio dissolvido em função do tempo, obtendo-se assim uma relação linear na qual o coeficiente angular era referente à velocidade de consumo de OD,  $Q_{O_2X}$  (mg  $O_2$ /L.min), conforme descrito no item 3.4.4 (Equação 3.28). Deste, foi descontado o valor relativo à respiração endógena e, então, dividiu-se o valor resultante pela concentração celular já determinada, encontrando a velocidade específica de consumo de oxigênio,  $Q_{O_2}$  (mg  $O_2$ /gSST.min). Através do fator estequiométrico de conversão entre oxigênio e amônio (4,25 mg  $O_2$ /mg N-NH $_4^+$ , vide Equação 3.14), pode-se calcular ainda a velocidade específica de consumo de substrato (mg N-NH $_4^+$ /gSST.d).

A partir das velocidades de consumo de substrato e das respectivas concentrações de amônio foram obtidos os parâmetros cinéticos do modelo cinético de ANDREWS (1968) através de uma regressão não linear dos dados, pelo método Quasi-Newton, realizada no software STATISTICA 5.1.

Foram realizados esses ensaios cinéticos para diferentes concentrações celulares com a finalidade de variar a relação  $S_0/X_0$  de modo mais amplo.

#### **4.3. INFLUÊNCIA DO NITRITO NOS ENSAIOS DE ATIVIDADE NITRIFICANTE**

A toxicidade do nitrito em relação a microrganismos tem sido reportada em inúmeras pesquisas. Foi observado que, durante os ensaios de atividade, a amônia fornecida em cada pulso gerava uma quantidade de nitrito e esta quantidade se acumulava ao longo do teste. Assim para que se pudesse verificar uma possível interferência deste acúmulo, na medida da atividade específica, decidiu-se fazer testes comparativos de forma a se garantir a ausência de nitrito em um deles.

Em um primeiro momento, a atividade da biomassa foi medida seguindo os passos propostos no item 4.2, ou seja, neste ensaio, foram dados vários pulsos de amônio em sequência obtendo-se a queda de oxigênio em função do tempo, para uma única amostra analisada. Desta forma, a atividade medida para cada pulso, considerava a presença de nitrito gerada até o momento devido ao substrato fornecido ao mesmo. Para este ensaio a concentração celular da suspensão preparada foi de 2,65 gSST/L.

Posteriormente partindo-se do mesmo inóculo do reator do qual se partiu o preparo para o ensaio anterior, preparou-se cinco porções com concentrações que variaram de 2,62 gSST/L à 2,85g/L (similares à concentração utilizada no ensaio anterior). Para cada uma destas porções, foi dado um único pulso de amônio, cada qual com uma concentração diferente para as quais também foram medidas as quedas de oxigênio em função do tempo. Desse modo, o substrato ( $\text{NH}_4^+$ ) era imposto a um meio livre de nitrito e a medida da atividade para estas cinco bateladas preparadas não sofriam quaisquer interferências relacionadas ao residual de nitrito. Os pulsos de amônio foram fornecidos neste segundo teste, de forma a abranger uma faixa de substrato similar àquela obtida no primeiro ensaio.

#### **4.4. REPRODUTIBILIDADE DA QUEDA DE OXIGÊNIO**

Em estudo realizado por CABEZAS (2004), foi constatado que possíveis inativações enzimáticas poderiam ocorrer quando a biomassa suspensa em meio ausente de substrato fosse submetida a um longo período de aeração, interferindo inicialmente na medida da atividade nitrificante.

Realizou-se um experimento para verificação de possíveis influências sobre medidas respirométricas, em casos onde um pulso único é empregado para a determinação de  $Q_{O_2}$  e conseqüente medida da atividade nitrificante. Assim sendo, preparou-se um ensaio utilizando uma concentração celular de aproximadamente 2,7 gSST/L. Seguindo os procedimentos descritos anteriormente, mediu-se a respiração endógena e aplicou-se um pulso de amônia a este meio. Realizou-se a leitura da queda de oxigênio dissolvido no meio, aerou-se o sistema e novamente mediu-se a queda de

OD. Repetiu-se este procedimento de modo a se obter quatro quedas de OD consecutivas e comparou-se os valores de  $Q_{O_2}$  obtidos para cada uma. Posteriormente também foram realizados ensaios similares utilizando maiores concentrações de amônio.

#### 4.5. DETERMINAÇÃO DO $K_LA$

Inicialmente pressupõe-se que a transferência de oxigênio através da superfície do líquido no biorreator utilizado nos testes de atividade nitrificante é baixa o suficientemente para ser considerada nula. Porém, caso ocorra o contrário, há transferência de oxigênio pela superfície e, quando se interromper a aeração, teremos ainda uma cota de oxigênio sendo fornecido ao sistema, e esta pode vir a prejudicar a determinação da velocidade específica de respiração das células. Desta forma, foi realizado a determinação do coeficiente volumétrico de transferência de oxigênio,  $K_La$ , através do método dinâmico (SCHMIDELL, 2001), empregando um sensor de oxigênio dissolvido para a medida do oxigênio dissolvido no líquido do biorreator.

Montou-se o sistema empregado nos ensaios cinéticos substituindo-se a solução contendo o material celular, primeiramente, por água. Ajustaram-se as condições operacionais utilizadas nos ensaios (agitação de 300 rpm e temperatura de 35°C), e então, borbulhou-se gás argônio na solução de forma a eliminar todo o oxigênio dissolvido no líquido. Em seguida, interrompeu-se a passagem deste gás e iniciou-se a leitura do aumento da concentração de oxigênio dissolvido no meio.

A seguir estão apresentadas as equações utilizadas para o cálculo do  $K_La$ . Partindo-se da equação 3.26 apresentada no item 3.4.4, para um meio líquido na ausência de microrganismos ( $Q_{O_2}X=0$ ), tem-se que:

$$\frac{\partial C_{O_2}}{\partial t} = K_L a \cdot (C^* - C_{O_2}) \quad (4.5)$$

Integrando-se esta equação mediante a separação de variáveis, obtém-se:



$$\ln \left[ \frac{(C^* - C_{O_2})}{(C^* - C_{O_{2i}})} \right] = K_L a \cdot (t - t_i) \quad (4.6)$$

Onde,

$C^*$  = Concentração de oxigênio dissolvido na saturação (mg  $O_2$ /L);

$C_{O_{2i}}$  = Concentração de oxigênio dissolvido em  $t_i=0$  (mg $O_2$ .L<sup>-1</sup>);

$C_{O_2}$  = Concentração de oxigênio dissolvido no meio no tempo  $t$  (mg  $O_2$ .L<sup>-1</sup>);

$t$  = tempo em um instante qualquer (min);

$t_i$  = instante inicial (min)

Plotando-se os valores de  $\ln(C^*-C)/(C^*- C_{O_{2i}})$  em função do tempo ( $t-t_i$ ), segundo a Equação 4.6, observe-se o coeficiente angular,  $K_L a$ .

Para representar melhor as condições proporcionadas nos ensaios realizou-se a determinação do  $K_L a$  também para a de nutrientes à que as células eram suspensas.

## 4.6. MÉTODOS ANALÍTICOS

### 4.6.1. Determinação da Amônia

Método: Para efetuar a determinação de amônia utilizou-se o método colorimétrico de Nessler, descrito por VOGUEL (1981).

#### Reagentes:

Nessler: Para o preparo de reagente Nessler utilizou-se 100g de iodeto de mercúrio (II) e 70g de iodeto de potássio, dissolvendo-se em 100mL de água destilada, adicionando-se após este procedimento uma solução fria de 160g de NaOH dissolvida em 700mL de água destilada, completando-se então para 1L. Deixou-se decantar por alguns dias a fim de separar o precipitado e realizou-se ainda uma padronização desta solução com cloreto de amônio.

Síntese do método: Esta metodologia consiste na adição do reagente à amostra na proporção de 1:50 e decorrentes 10 minutos, efetuou-se a leitura da absorbância a 525nm em espectrofotômetro. Com o valor da absorbância obteve-se a concentração de amônia através de uma curva padrão obtida através de uma solução de cloreto de amônio. Para a determinação das amostras utilizou-se o equipamento HACH DR/2010.

#### **4.6.2. Determinação de Nitrito**

Método: A concentração de nitrito foi determinada pelo uso de kit analítico da HACH.

Reagentes: NitriVer 2 (HACH Company).

Síntese do Método: Consiste na adição de reagentes promotores da redução do nitrito a óxido nitroso na presença de sulfato ferroso em meio ácido. O óxido é convertido em um cromógeno pela reação com o cádmio e assim sendo, pode-se realizar leitura em espectrofotômetro à 585 nm. A proporção utilizada por este método é de um envelope do reagente para cada 10 mL de amostra utilizados. O tempo reacional é de 10 minutos, após os quais foi realizada a leitura da absorbância no comprimento de onda indicado em equipamento HACH DR/2010.

Curva padrão: É feita pelo uso de solução de  $\text{NaNO}_2$ . Faixa 0 a 150 mg  $\text{NO}_2$ -/L.

#### **4.6.3. Determinação de Nitrato**

Método: O nitrato foi quantificado pelo método do ácido salicílico de acordo com CATALDO et al (1975).

Reagentes:

- ⇒ AS- $\text{H}_2\text{SO}_4$ : Consiste na preparação do reagente AS- $\text{H}_2\text{SO}_4$ , dissolvendo-se 50g de ácido salicílico com  $\text{H}_2\text{SO}_4$  concentrado, completando-se para um litro.

⇒ NaOH 2N: Esta solução foi preparada à partir da dissolução de 80g de NaOH em água destilada, tendo o seu volume completado para um litro.

Síntese do Método: Adicionou-se 200 µL à 0,8mL deste reagente. Aguardou-se 20 minutos para que ocorresse a reação, e adicionou-se 19mL de solução de NaOH 2N, sendo Em seguida leu-se a absorbância em comprimento de onda igual à 410nm em equipamento HACH DR/2010. Para a determinação da concentração de nitrato utilizou-se uma curva de calibração preparada com KNO<sub>3</sub>.

#### **4.6.4. Determinação de Sólidos Suspensos Voláteis e Sólidos Suspensos Totais**

Os sólidos suspensos totais foram determinados por massa seca através da filtração em papel filtro qualitativo e secagem em forno de microondas na potência de 180W por 15 min, segundo uma adaptação realizada sobre a metodologia proposta por OLSON & NIELSEN, 1997.

Para a determinação dos sólidos suspensos totais seguiu-se o método descrito pelo *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APA, AWWA, WEF, 1995).

#### **4.6.5. Determinação do pH**

Método: A determinação do pH foi realizada diariamente no reator, em pHmetro da marca QUIMIS, calibrado segundo os procedimentos seguidos pela APHA (1995), com soluções tampão de pH 7,0 e 4,0.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

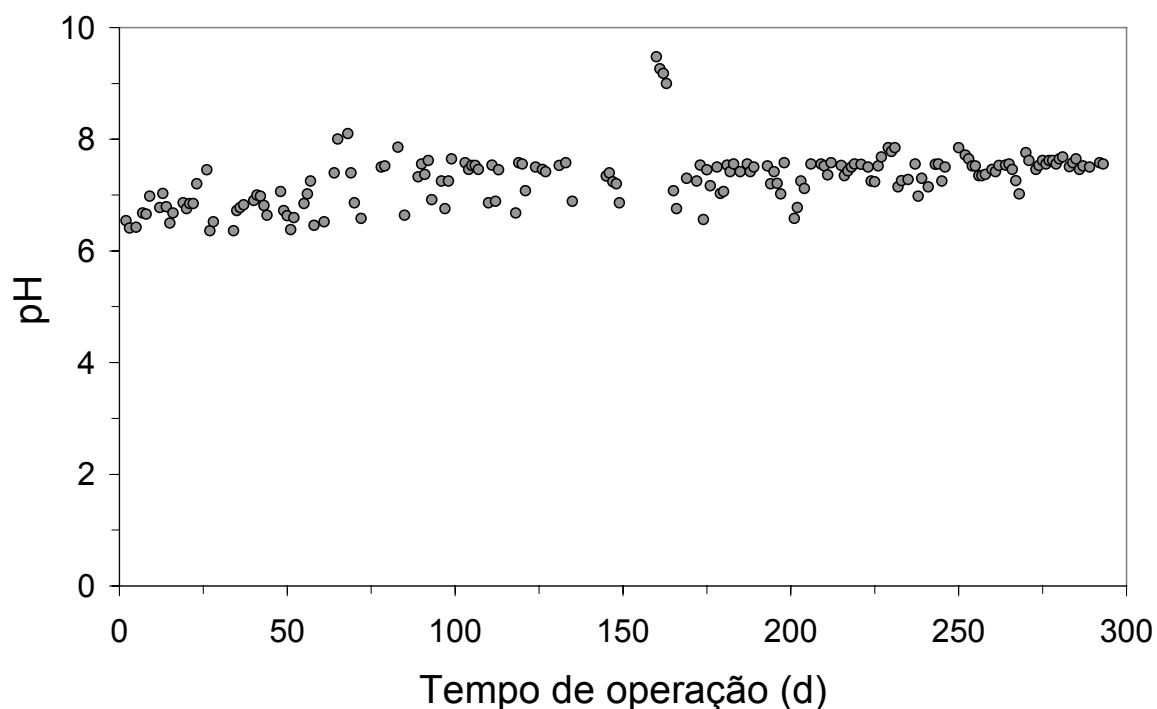
### 5.1. OPERAÇÃO DO REATOR PARA MANUTENÇÃO DO INÓCULO

A análise de sólidos totais (SST) e sólidos voláteis (SSV) realizadas para o lodo de inóculo proveniente da estação de tratamento local, apresentou os valores de 30,13 g/L e 23 g/L respectivamente. Após a montagem do reator, estes valores foram reduzidos para 12,3 gSST/L e 9,0 gSSV/L, devido à diluição empregada. A atividade específica da biomassa nitrificante também foi determinada para o reator nesta fase inicial e será apresentada posteriormente.

O monitoramento das formas nitrogenadas de entrada e saída, bem como o acompanhamento do pH, foram realizados diariamente e estão mostrados graficamente na Figura 5.1. Ainda nesta figura estão apresentadas as respectivas conversões de nitrogênio da forma amoniacal para a forma de nitrato, em cada dia de operação.

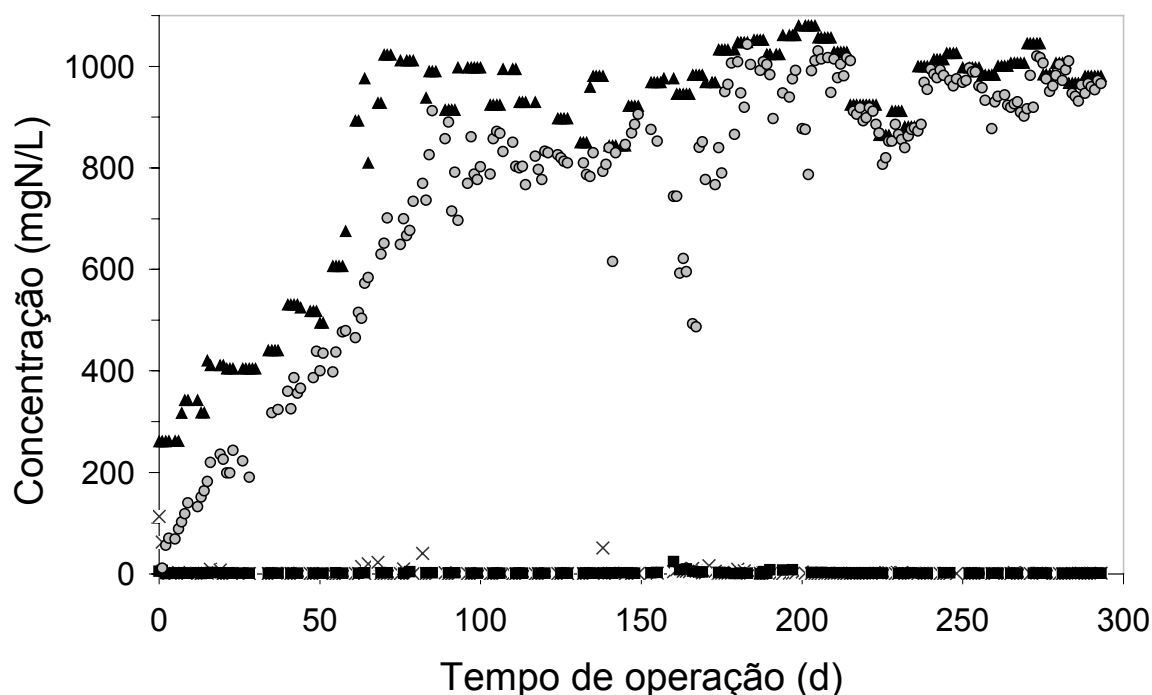
O pH de saída do reator apresentou variações durante a operação no mesmo, permanecendo em valores mais estáveis no final do período apresentado. A dificuldade de manutenção deste pode estar relacionada ao fato da correção do pH ser realizada após a alimentação do reator e não durante todo o período diário. Assim, visando uma uniformidade do pH do reator, foram realizados pequenos ajustes quanto à proporção de bicarbonato de sódio no meio de alimentação.

Evidências de uma situação instável no reator ocorreram por volta do 159º dia de operação. Neste período o reator apresentou altos valores de pH, como pode ser observado na Figura 5.1. Neste dia foi observada a presença de material espumante no reator e, ainda, que o líquido sobrenadante retirado do mesmo apresentava uma coloração escura. Por estes indícios e devido à forte instabilidade ocorrida no reator, acreditou-se na possível ocorrência de morte celular no reator. Este fato ainda pode ser confirmado através da redução da atividade nitrificante da biomassa medida em períodos posteriores como pode-se observar pelos valores apresentados na Tabela 5.1.



**Figura 5.1:** Monitoramento do pH de saída do reator durante o período operacional.

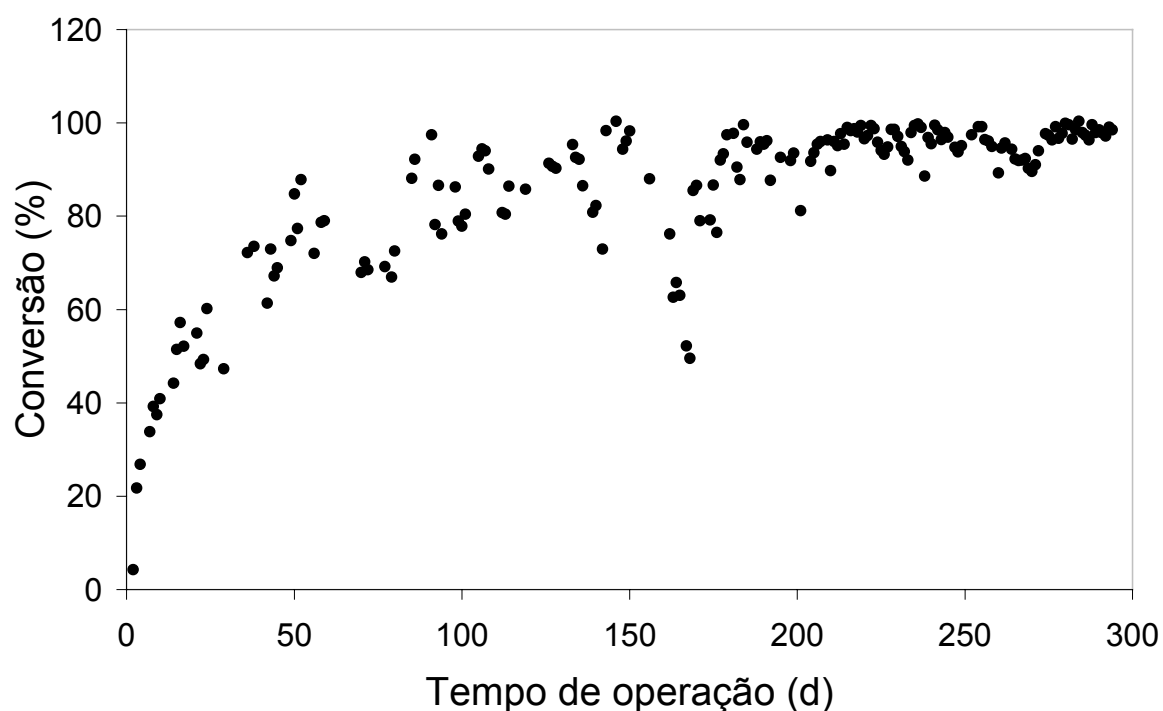
Visto que o reator em questão objetivou o fornecimento de material celular para uso em ensaios de atividade nitrificante, foi realizada, inicialmente, uma progressão da carga de amônia na alimentação do reator, durante aproximadamente os primeiros 70 dias, conforme descrito no Item 4.1.1. Esta progressão enfatizou o enriquecimento da biomassa autotrófica desejada pela introdução de fonte de substrato específica e, desta maneira, impondo condições seletivas do meio de cultivo que desfavoreceram o crescimento de microrganismos heterotróficos inicialmente presentes no inóculo. Esta progressão pode ser observada na Figura 5.2, através do acompanhamento da amônia de entrada.



**Figura 5.2:** Monitoramento da concentração das formas nitrogenadas do reator:

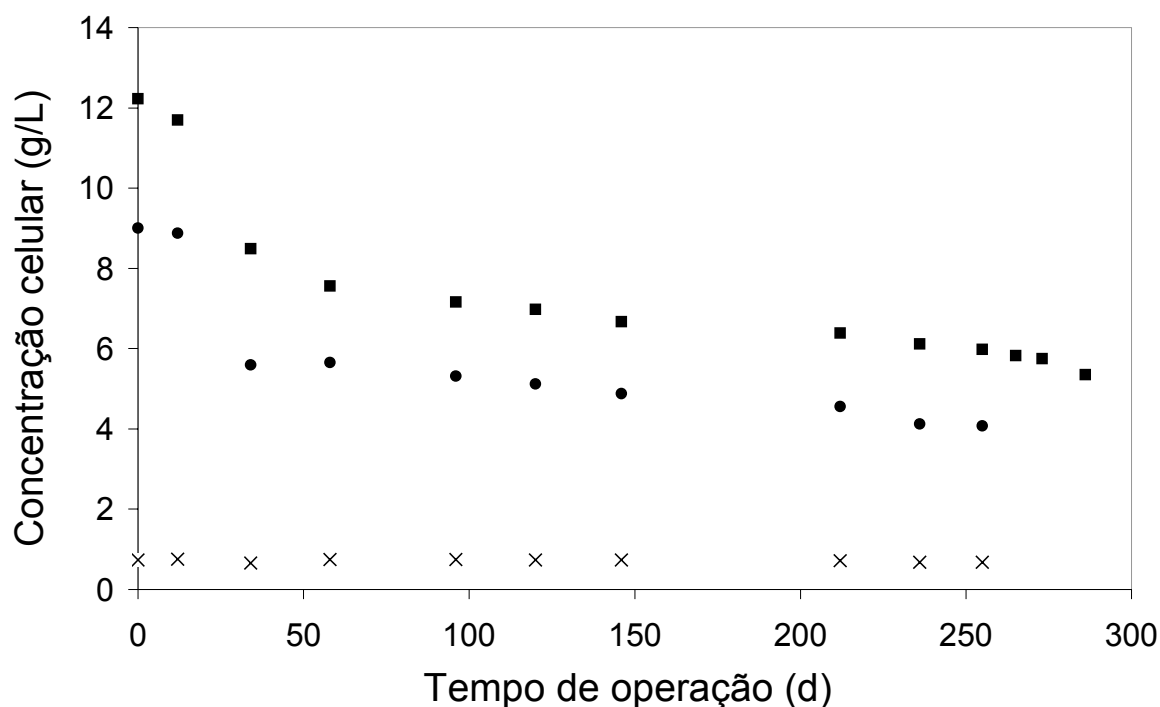
(▲)N-NH<sub>4</sub> Entrada; (x)N-NH<sub>4</sub> Saída; (●) N-NO<sub>3</sub> Saída; (■) N-NO<sub>2</sub> Saída.

O nitrato resultante da conversão da amônia alimentada correspondeu ao comportamento da progressão de carga. Através da Figura 5.3 ainda pode-se observar que durante esta progressão de carga, a conversão de amônia a nitrato foi aumentando expressivamente, chegando a valores próximos a 70% ao final deste período. Este acompanhamento da conversão indica significativa resposta da biomassa desejada nitrificante. Valores superiores a 98% de conversão ainda foram obtidos durante o período operacional remanescente. Novamente, observa-se que para o período, comentado anteriormente, em que houve um desequilíbrio, estes valores declinaram voltando, porém, gradativamente a aumentar. O declínio do nitrato, resultante da nitrificação, pode estar associado à uma possível perda da amônia por volatilização visto que, o pH do reator se encontrava alto e que o reator não apresentou acúmulo de nitrito nem amônia no reator neste período. A amônia e o nitrito residual apresentaram valores desprezíveis durante a maior parte da operação deste reator.



**Figura 5.3:** Conversão de  $\text{N-NH}_4$  em  $\text{N-NO}_2$  durante o período operacional.

Também foi realizado o acompanhamento da variação da concentração dos sólidos do reator em questão, sendo esta apresentada na Figura 5.4. Observa-se a ocorrência de perdas significativas do material suspenso, principalmente no início da operação do mesmo. Fatores como o decaimento de células e remoção de sólidos grosseiros advindos do lodo inoculado podem ter contribuído para esta redução. Dificuldades quanto à sedimentação do material suspenso foram observadas durante o período de decantação, tendo como consequência, um arraste deste material com o sobrenadante retirado do reator. Ainda pode-se mencionar o fato de ocorrerem pequenas remoções de células devido à utilização das mesmas em ensaios de atividade nitrificante. Desta forma, visto que o crescimento das bactérias nitrificantes é lento, as perdas de material suspenso não foram compensadas pela multiplicação destes microrganismos.



**Figura 5.4:** Variações dos sólidos suspensos durante a operação do reator:

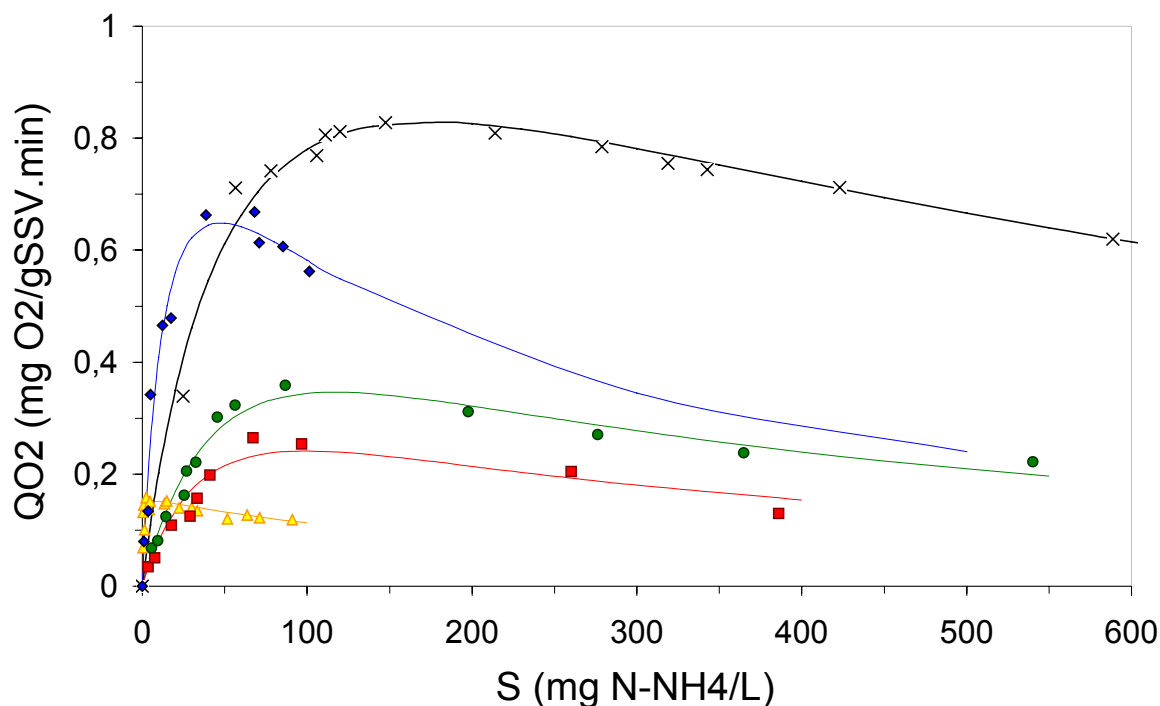
(■)SST; (●)SSV; (x)SSV/SST

Após o 255º dia de operação, tirou-se vantagem da constância do valor da relação SSV/SST do lodo aclimatado sendo então, a partir desta data, realizadas somente análises de SST. Essa medida foi adotada principalmente no sentido de facilitar o procedimento utilizado nos ensaios de atividade específica. O valor da relação SSV/SST utilizado foi de 0,6812 gSSV/gSST, que foi obtido, considerando-se tanto os valores medidos durante o acompanhamento do reator, como também, os valores de SSV e SST determinados durante os testes de atividade nitrificante.

Visto que a manutenção deste reator teve com objetivo manter uma flora rica em bactérias nitrificantes, foram realizados testes de atividade específica através de ensaios respirométricos a fim de se observar o estado fisiológico das células ao longo do período em que o reator foi operado. Os respectivos ensaios foram feitos com concentração celular relativamente próximas ( $0,75 \leq \text{SSV} \leq 0,81$ ) de modo a facilitar comparações entre as medidas, visto que este trabalho verifica justamente a influência desta grandeza sobre a determinação da atividade. A Figura 5.5, bem como a Tabela



5.1, apresentam a evolução da atividade nitrificante durante o período de adaptação dos microrganismos presentes no reator.



**Figura 5.5:** Acompanhamento da velocidade específica de consumo de oxigênio da biomassa presente no reator: (▲) 7º d; (◆) 92º d; (■) 189º d; (●) 218º d; (x) 293º d.

**Tabela 5.1:** Velocidade específica de respiração do lodo para diferentes dias de operação do reator.

Tempo de operação (d)	7	92	189	218	293
<b>QO<sub>2</sub>máx*</b> (mgO <sub>2</sub> /gSSV.min)	0,15	0,65	0,23	0,35	0,83
<b>Ks</b> (mg N-NH <sub>4</sub> /L)	0,26	15,58	37,00	63,42	58,45
<b>Ki</b> (mg N-NH <sub>4</sub> /L)	233,29	145,64	314,57	214,74	518,80

Dados obtidos através de ajuste pelo modelo de Andrews; \* valor corrigido de QO<sub>2</sub>máx, vide Equação 3.17.

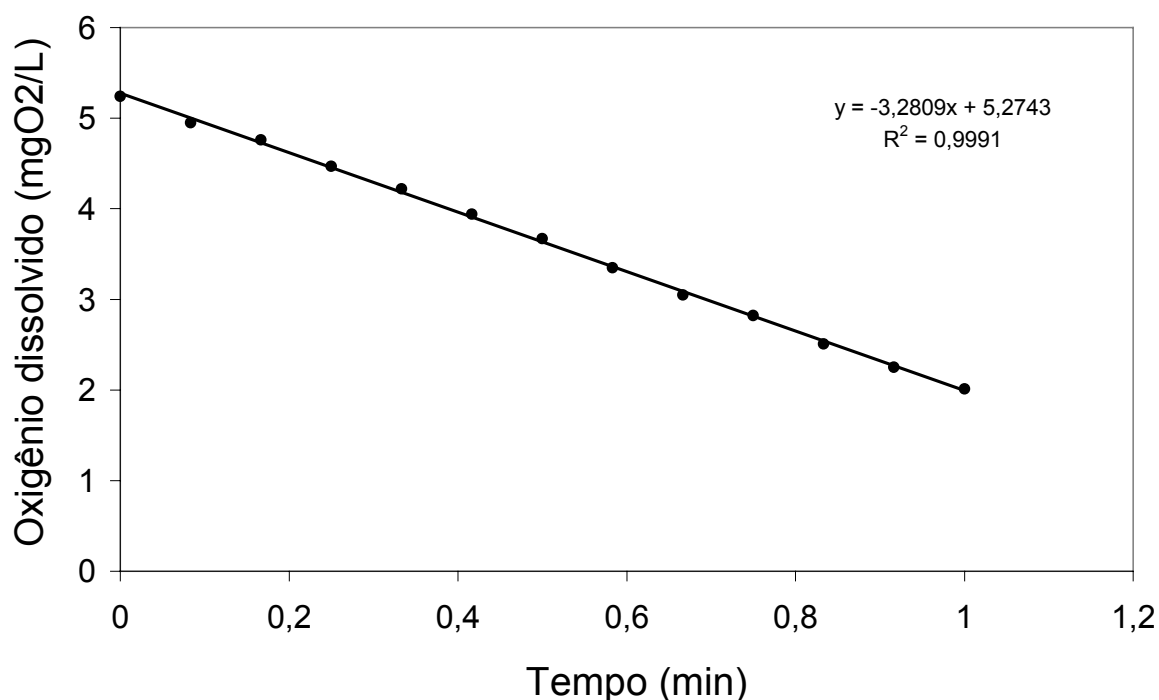
Comparando-se as máximas velocidades específicas de respiração, QO<sub>2</sub>Xmáx, obtidas para o 7º e 92º dia, pode-se observar um aumento significativo na atividade das bactérias nitrificantes, associadas provavelmente, à progressão de carga realizada no reator. Embora o lodo já devesse estar bem aclimatado após a progressão de carga, no

189º dia de operação, verificou-se um decréscimo da atividade medida, quando comparado à medida anterior realizada, do 92º dia. Este decréscimo da atividade no 189º dia foi, provavelmente, em decorrência da instabilidade ocorrida no processo por volta do 159º dia de operação e, assim, no período em que a atividade foi medida, acredita-se que o lodo encontrava-se ainda em recuperação. As medidas de atividade realizadas subsequente ao dia 189 mostram um aumento significativo de forma gradativa à medida que decorreu o tempo de operação, demonstrando que o reator teve sua capacidade nitrificante elevada devido à seleção desta flora microbiana.

Através destes ensaios de atividade pode-se observar claramente a grande sensibilidade da metodologia empregada em medir as variações da atividade dos microrganismos nitrificantes, e que esta, desta forma, pode ser uma ferramenta muito útil para avaliar o estado fisiológico das células no processo de nitrificação.

## **5.2. MEDIDA DE $Q_{O_2}$ E OBTENÇÃO DE PARÂMETROS**

Para quantificar a atividade nitrificante foram realizados testes cinéticos por respirometria relacionando, desta forma, a velocidade específica de respiração com o potencial da biomassa de realizar a nitrificação. Em diversos casos, os respirômetros são acoplados a instrumentos de registros que fornecem os chamados respirogramas, através do qual pode-se verificar o comportamento do oxigênio dissolvido durante toda a extensão do teste de forma mais direta. No caso do sistema empregado, a medida do consumo de oxigênio, foi realizada de forma manual efetuando-se as leituras do oxigênio dissolvido no meio em curtos intervalos de tempo. Deste modo, a velocidade específica de respiração,  $Q_{O_2}$ , para cada concentração de substrato utilizada, foi determinada conforme descrito no item 3.8. Como exemplo desta determinação podemos observar a Figura 5,6, obtida para um pulso de 574,63 mg N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>/L imposto ao meio para ensaio respirométrico em que se utilizou 5,83 gSST/L como concentração celular, vide apêndices 15A e 17N.



**Figura 5.6:** Variação da concentração de oxigênio dissolvido em função do tempo para ensaio típico de respirometria.

Partindo da equação obtida para a queda apresentada, a velocidade de consumo de oxigênio, dada pelo coeficiente angular, é:

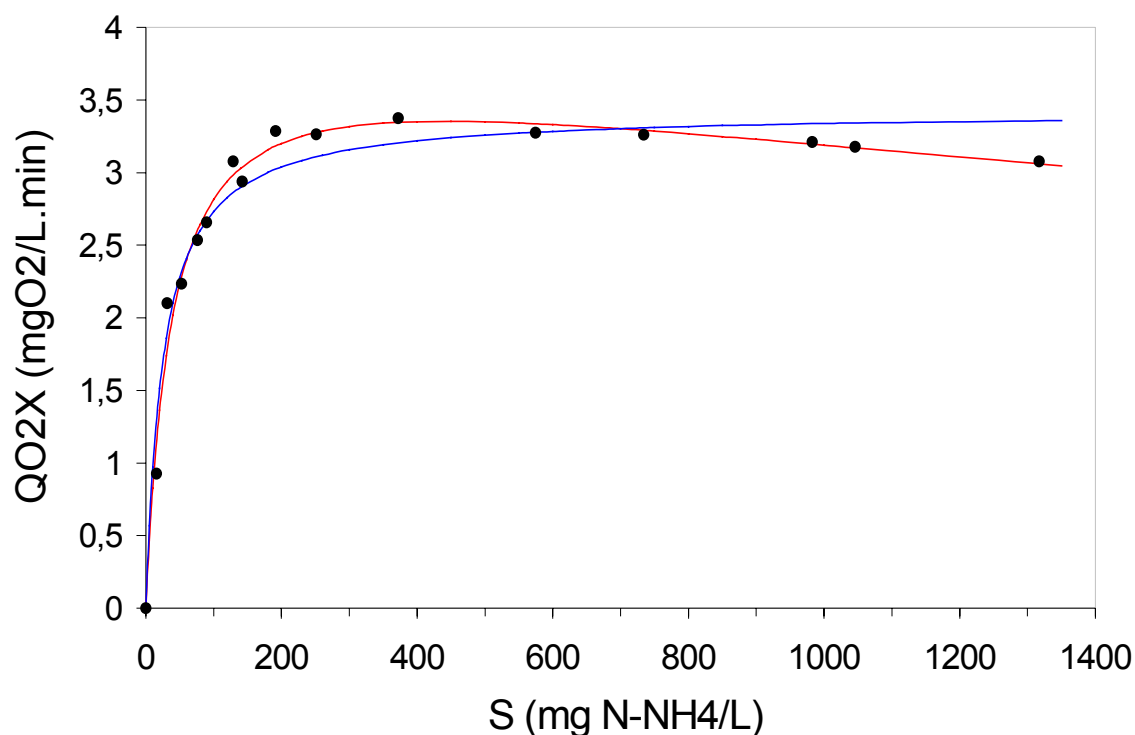
$$Q_{O_2X} = 3,28 \text{ mg O}_2 \cdot (\text{L} \cdot \text{min})^{-1} \quad (4.5)$$

Para a determinação da velocidade específica,  $Q_{O_2}$ , descontou-se o valor obtido de forma análoga na queda de oxigênio respectiva à respiração endógena para este ensaio (vide Apêndice 12), que foi de  $0,01 \text{ mgO}_2 \cdot (\text{L} \cdot \text{min})^{-1}$  e, então, dividiu-se o valor obtido pela concentração celular utilizada no ensaio. Desta forma, obteve-se:

$$Q_{O_2} = (3,28 - 0,01) / 5,83 = 0,56 \text{ mgO}_2 \cdot (\text{gSST} \cdot \text{min})^{-1} \quad (4.6)$$

Deste modo, através dos dados obtidos para cada pulso fornecido durante um ensaio de atividade específica eram calculadas as velocidades específicas de respiração as quais eram então ajustadas a um modelo para a obtenção dos parâmetros. Como foram observados efeitos inibitórios quando a biomassa era exposta à altas

concentrações de substrato, utilizou-se o ajuste dos pontos experimentais ao modelo cinético de Andrews. Para alguns ensaios, porém, o efeito inibitório não foi tão pronunciado e nestes casos o modelo de Monod também poderia ser utilizado, como mostra a Figura 5.7.



**Figura 5.7:** Dados experimentais obtidos para ensaio com 5,83gSST/L e ajuste aos modelos cinéticos de: (—) Monod; (—) Andrews.

As velocidades específicas máximas de respiração obtidas pelos pontos experimentais e pelo ajuste aos modelos cinéticos de Monod e Andrews, encontradas para o ensaio com 5,83 gSS/L, bem como a correlação obtida para cada ajuste, estão apresentados na Tabela 5.2.

**Tabela 5.2:** Velocidade de respiração obtida pelo ajuste dos dados experimentais para o ensaio de atividade específica com 5,83 gSST/L.

	SST (g/L)	$Q_{O_2X_{máx}}$ Experimental (mg O <sub>2</sub> /L.min)	$Q_{O_2X_{máx}}$ * (mg O <sub>2</sub> /L.min)	$R^2$
<b>Monod</b>	5,83	3,3754	3,4213	0,98134
<b>Andrews</b>	5,83	3,3754	3,3526	0,99222

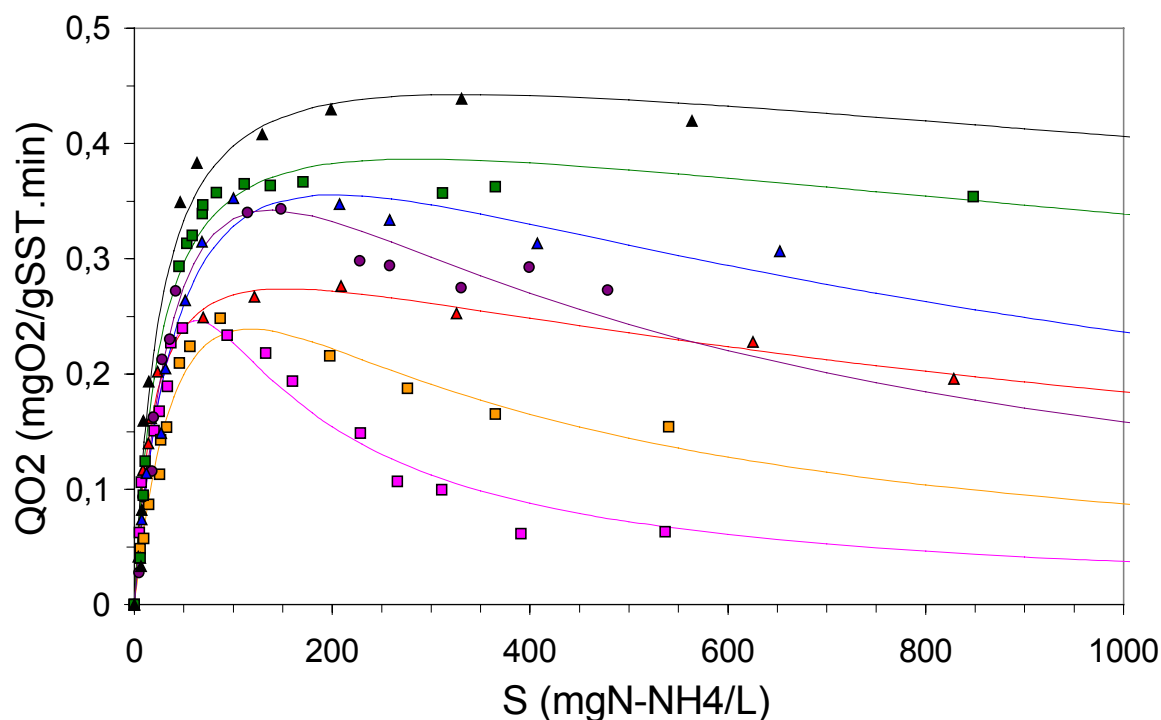
\*Valor corrigido de  $Q_{O_2máx}$ , vide Equação 3.17.

Pode-se dizer que ambos modelos representam bem o comportamento da biomassa quando esta não se encontra fortemente inibida por concentrações altas de amônio. Contudo na maior parte dos ensaios realizados observou-se um efeito inibitório e, visto que, o modelo de Andrews incorpora termo relacionado com a inibição por substrato, este representou de modo adequado todos os ensaios realizados com sucesso.

### 5.3. INFLUÊNCIA DA RELAÇÃO $S_0/X_0$

A fim de se encontrar a melhor relação entre o substrato e a concentração celular para a metodologia adotada neste trabalho, foram realizados ensaios variando-se a concentração de biomassa utilizada entre 0,5 e 5,8 gSST/L.

Primeiramente, foram efetuados ensaios de atividade para o lodo, entre o 214° e 222° dia de operação do reator, para os quais foram determinadas as velocidades de respiração do lodo para diferentes concentrações celulares, que variaram entre 0,53 e 4,26 g SST/L. As curvas obtidas para a velocidade de consumo de oxigênio ( $Q_{O_2}$ ) em função da concentração de substrato ( $N-NH_4^+$ ) e da concentração celular de cada ensaio estão apresentadas na Figura 5.8. A Tabela 5.3 mostra os parâmetros obtidos pelo ajuste segundo o modelo cinético de Andrews em relação aos dados com as concentrações celulares utilizadas nestes ensaios.



**Figura 5.8:** Curva de  $Q_{O_2}$  para diferentes concentrações celulares obtidas para o lodo entre o 214º e 222º dia de operação do reator: (■) 0,53 gSST/L; (■) 1,14 gSST/L; (▲) 1,56 gSST/L; (●) 2,52 gSST/L; (▲) 3,02 gSST/L; (■) 3,51 gSST/L; (■) 4,26 gSST/L.

**Tabela 5.3:** Parâmetros estimados através de ajuste aos dados experimentais do 1º Grupo.

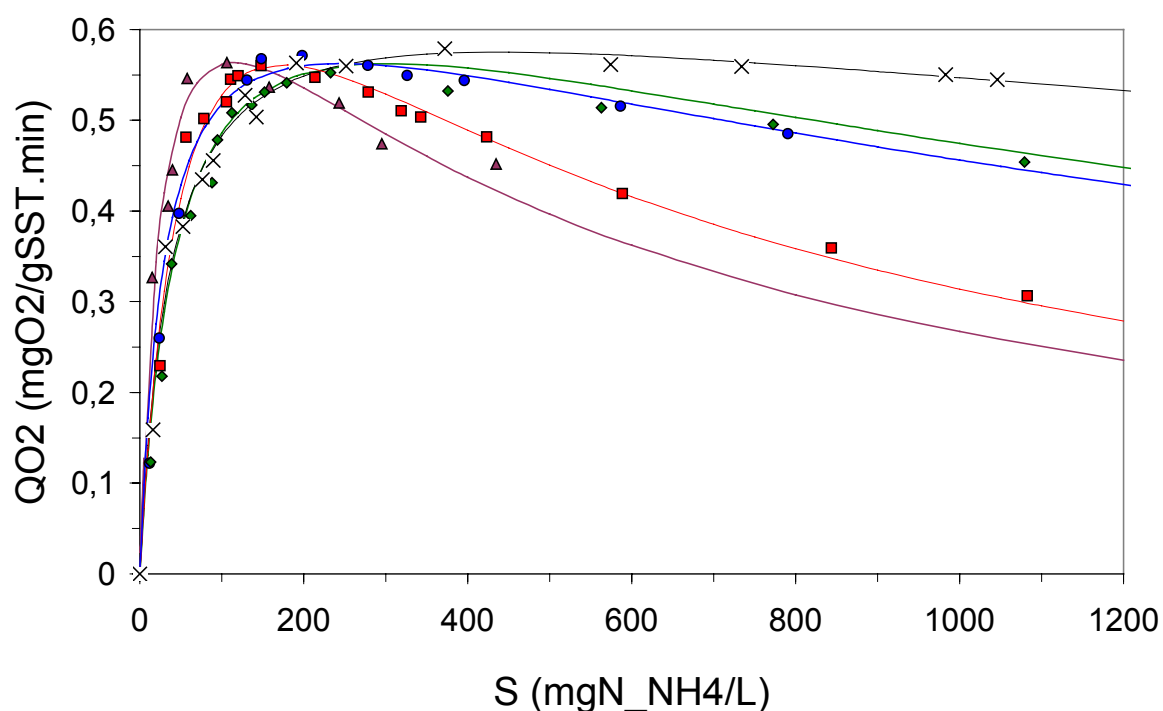
X (gSST/L)	0,53	1,14	1,56	2,52	3,02	3,51	4,26
$Q_{O_2\text{máx}}^*$ (mgO <sub>2</sub> /gSST.L)	0,25	0,24	0,27	0,34	0,36	0,39	0,44
<b>Ks</b> (mgN-NH <sub>4</sub> /L)	129,14	63,42	20,09	52,38	47,72	26,66	26,37
<b>Ki</b> (mgN-NH <sub>4</sub> /L)	30,88	214,74	1173,04	364,21	860,80	3064,7	4259,51
<b>R<sup>2</sup></b>	0,98	0,99	0,99	0,98	0,99	0,99	0,98

Dados obtidos através de ajuste pelo modelo de Andrews; \* valor corrigido de  $Q_{O_2\text{máx}}$ , vide Equação 3.17.

Como pode ser observado pela Figura 5.8 e Tabela 5.3, neste ensaio cada concentração celular utilizada apresentou uma velocidade específica de respiração distinta em termos de seu valor máximo,  $Q_{O_2\text{máx}}$ . Foi observada ainda a ocorrência de

distintos níveis de inibição provocados pelo aumento da concentração de substrato. Inicialmente esperava-se que a velocidade específica de consumo de oxigênio seria da mesma ordem para as distintas concentrações celulares utilizadas, e ainda que estas apresentariam comportamento semelhante em relação ao efeito inibitório ocorrido a altas concentrações, pois, a princípio esta grandeza não deveria ser dependente da concentração celular. Observando o período em que foram realizados tais testes, verificou-se que houve uma redução na concentração de substrato alimentado no reator, fato este, que pode ter ocasionado variações quanto à atividade nitrificante do lodo, provocando assim, divergências quanto ao resultado esperado nestes ensaios. De qualquer forma, pode-se observar que a presente metodologia foi sensível o suficiente para indicar alterações na atividade nitrificante em virtude de mudanças ocorridas no reator.

Foi realizada posteriormente uma outra batelada de ensaios similar à apresentada anteriormente. Através destes novos ensaios pretendia-se, como já comentado, verificar mudanças no comportamento apresentado quando utilizado um lodo obtido de uma fase onde o reator se encontrava em situação mais estável. As amostras desta segunda batelada de ensaios foram coletadas no período entre o 255º e o 293º dia de operação. A Figura 5.9 mostra os resultados obtidos nestes testes de atividade.



**Figura 5.9:** Curva de  $Q_{O_2}$  para diferentes concentrações celulares obtidas para o lodo entre o 255º e 293º dia de operação do reator: ( $\blacktriangle$ ) 0,69gSST/L; ( $\blacksquare$ ) 1,19gSST/L; ( $\bullet$ ) 2,65gSST/L; ( $\blacklozenge$ ) 3,52gSST/L; ( $\times$ ) 5,83gSST/L.

**Tabela 5.4:** Parâmetros estimados através de ajuste aos dados experimentais do 2º Grupo.

X (gSST/L)	0,69	1,19	2,65	3,52	5,83
<b><math>Q_{O_2}^{m\acute{a}x*}</math> (mgO<sub>2</sub>/gSST.L)</b>	0,56	0,57	0,56	0,56	0,58
<b>K<sub>s</sub> (mgN-NH<sub>4</sub>/L)</b>	27,75	58,45	30,8	45,55	37,48
<b>K<sub>i</sub> (mgN-NH<sub>4</sub>/L)</b>	476,17	518,80	1953,44	2015,36	5189,54
<b>R<sup>2</sup></b>	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99

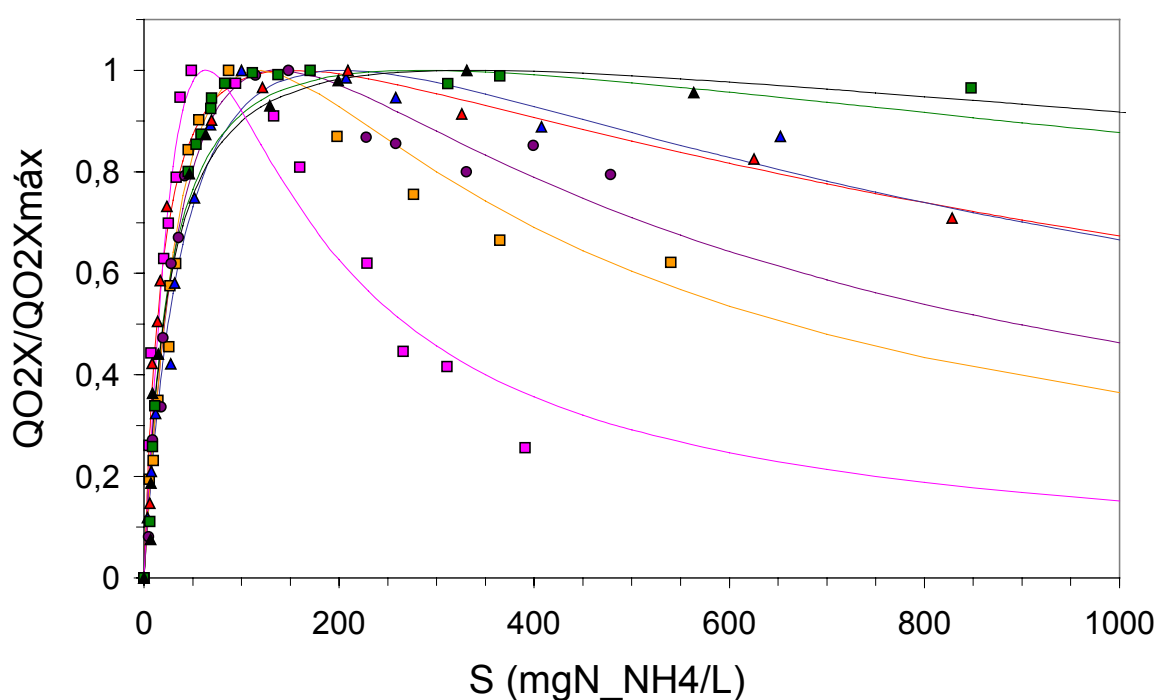
Dados obtidos através de ajuste pelo modelo de Andrews; \* valor corrigido de  $Q_{O_2}^{m\acute{a}x}$ , vide Equação 3.17.

Observa-se que para as diferentes concentrações de biomassa utilizadas não houve diferenças significativas com relação ao  $Q_{O_2}^{m\acute{a}x}$ , porém, a queda de  $Q_{O_2}$  com o aumento do substrato foi mais acentuada para concentrações celulares menores. Uma outra observação importante refere-se aos valores de  $Q_{O_2}$ , os quais apresentaram valores maiores quanto aos obtidos na batelada de ensaios anterior. As diferenças apresentadas entre o efeito inibitório para concentrações utilizadas se tornaram menos intensas

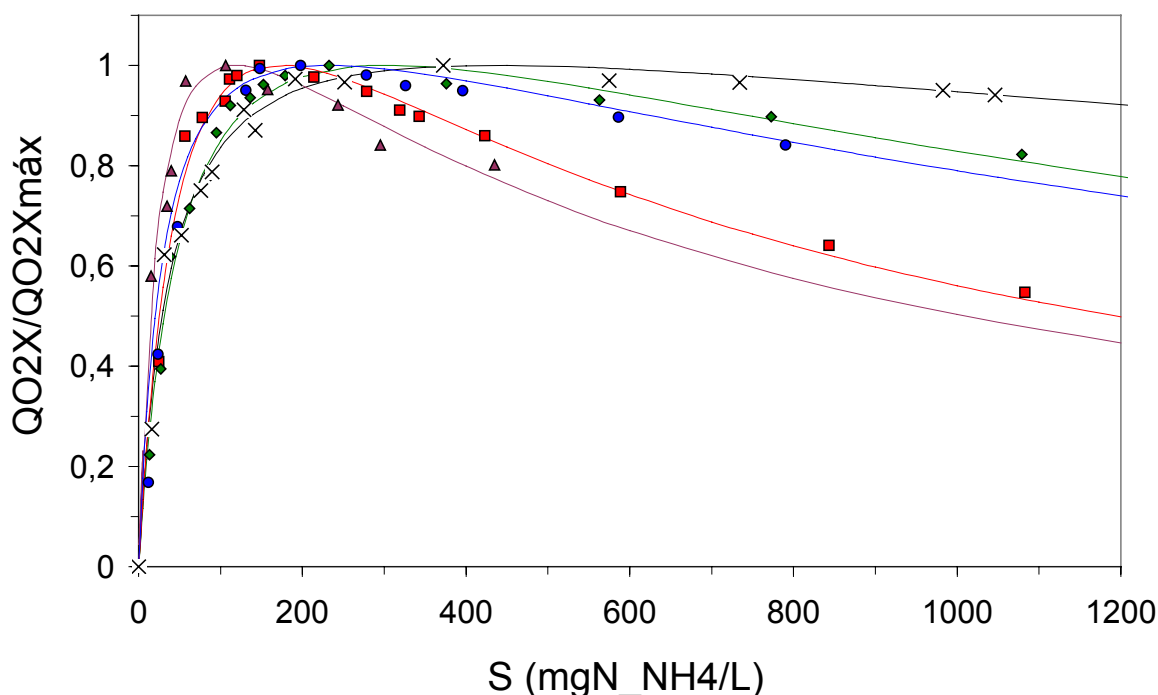


quando comparado ao mesmo efeito para concentrações similares nos ensaios anteriores.

Wiesman (1994) propõe que seja realizado um ajuste das velocidades de respiração relativas,  $Q_{O_2}X/Q_{O_2}X_{\text{máx}}$ , em função do substrato evitando desta forma uma propagação do erro relacionado à determinação experimental da concentração celular. As Figuras 5.10 e 5.11 mostram os valores das velocidades relativas obtidas para cada grupo de ensaios realizados.

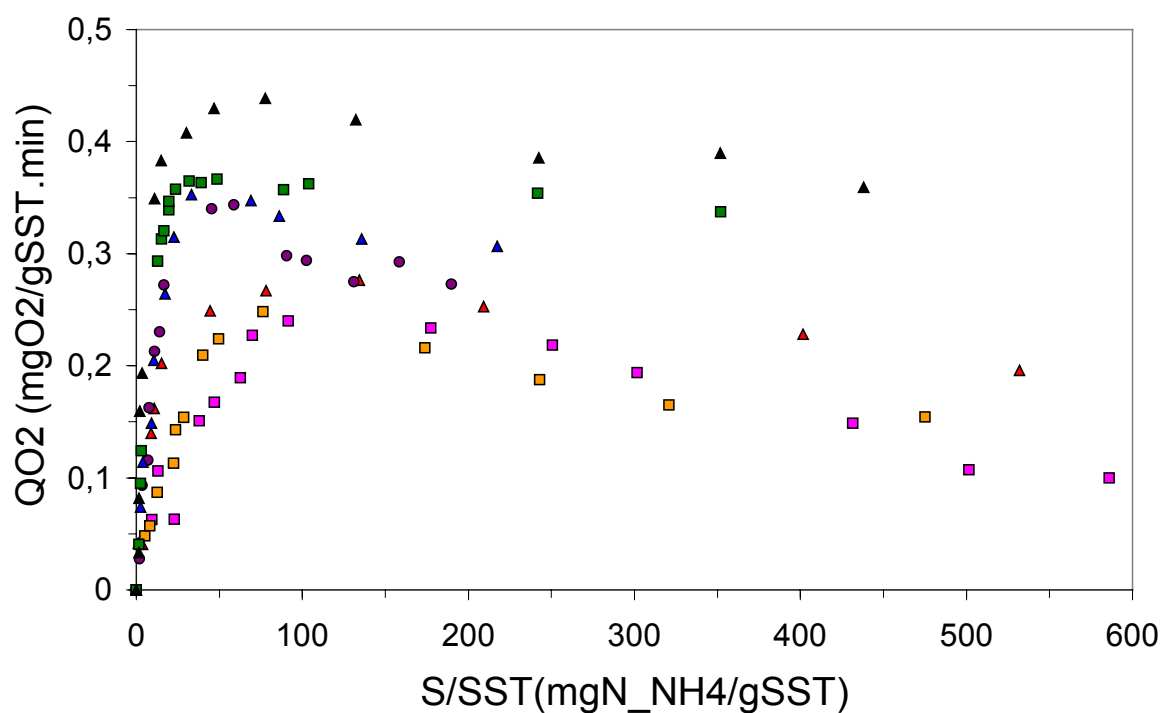


**Figura 5.10:** Relação entre  $Q_{O_2}X/Q_{O_2}X_{\text{máx}}$  e  $S$  para os ensaios realizados entre o 214º e 222º dia: (■) 0,53 gSST/L; (■) 1,14 gSST/L; (▲) 1,56 gSST/L; (●) 2,52 gSST/L; (▲) 3,02 gSST/L; (■) 3,51 gSST/L; (■) 4,26 gSST/L.

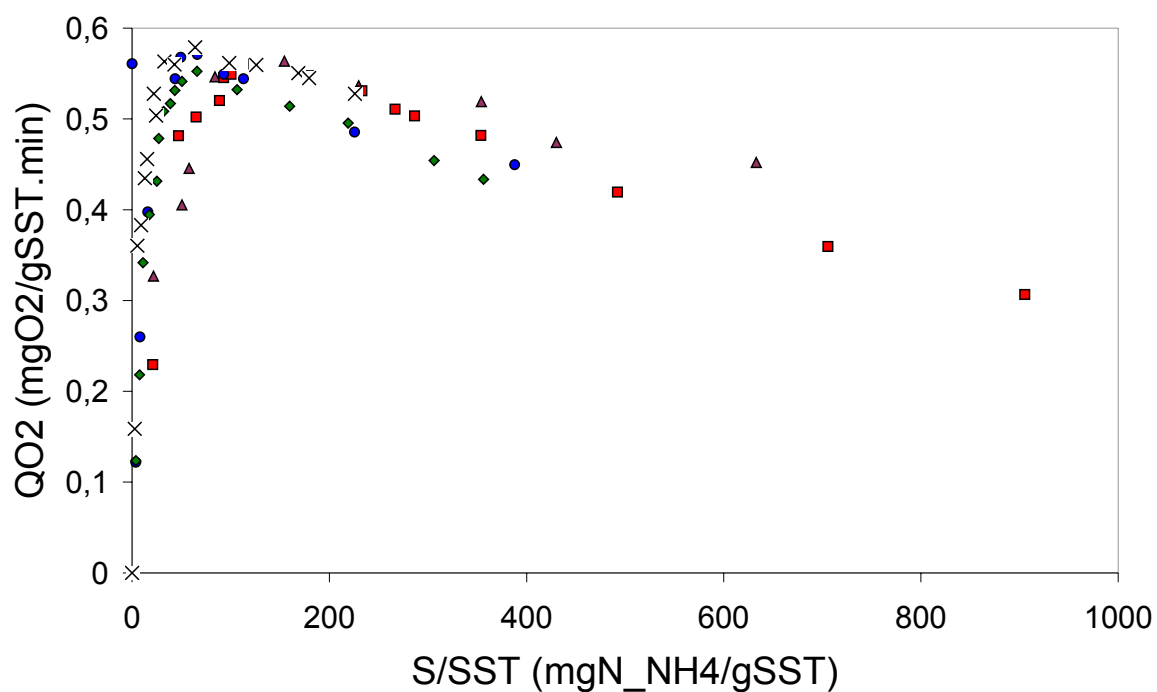


**Figura 5.11:** Relação entre  $Q_{O_2X}/Q_{O_2Xmáx}$  e  $S$  para os ensaios realizados entre o 255º e 293º dia: (▲) 0,69gSST/L; (■) 1,19gSST/L; (●) 2,65gSST/L; (◆) 3,52gSST/L; (X) 5,83gSST/L.

Observa-se que há uma clara relação entre a concentração de SST utilizada no ensaio e o nível de inibição provocado pelo aumento da concentração de substrato. Este efeito inibitório é observado tanto no valor de  $Q_{O_2}$  máximo alcançado, quanto no perfil da queda da velocidade específica de respiração com o aumento de substrato, de forma que, quanto maior foi a concentração de SST utilizada menor o efeito inibitório. Assim, com o intuito de se buscar similaridades entre o comportamento dos microrganismos frente ao consumo de oxigênio, foi verificado o comportamento da velocidade específica de consumo de oxigênio em função de uma relação entre a concentração de substrato e a concentração celular,  $S/SST$ . As Figuras 5.12 e 5.13 apresentam as novas curvas obtidas para os ensaios já relatados.



**Figura 5.12:** Relação entre  $QO_2$  e S/SST para os ensaios realizados entre o 214° e 222° dia: (■) 0,53 gSST/L; (■) 1,14 gSST/L; (▲) 1,56 gSST/L; (●) 2,52 gSST/L; (▲) 3,02 gSST/L; (■) 3,51 gSST/L; (■) 4,26 gSST/L.

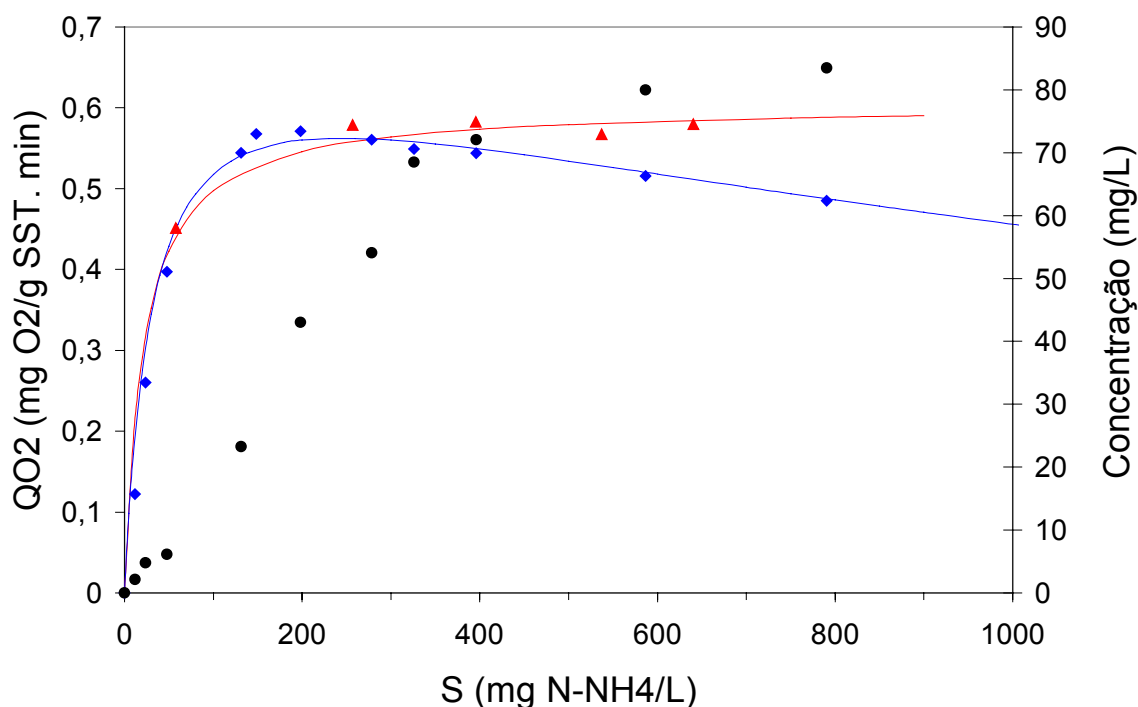


**Figura 5.13:** Relação entre  $QO_2$  e S/SST para os ensaios realizados entre o 255° e 293° dia: (▲) 0,69 gSST/L; (■) 1,19 gSST/L; (●) 2,65 gSST/L; (◆) 3,52 gSST/L; (X) 5,83 gSST/L.

Observa-se que os pontos experimentais das Figuras 5.12 e 5.13 apresentam-se com uma dispersão muito menor do que aquelas apresentadas aos respectivos grupos nas Figuras 5.8 e 5.9. Desta forma, através destas curvas, pode-se analisar de forma mais clara a faixa na qual estavam os valores de  $Q_{O_2\text{máx}}$  para cada concentração celular. Assim, pode-se afirmar que, para a realização dos ensaios de atividade nitrificante específica, a faixa ideal para o emprego da relação S/SST está entre 50 e 100mg N-NH<sub>4</sub>/L.

#### 5.4. INFLUÊNCIA DO NITRITO NA ATIVIDADE DA BIOMASSA NITRIFICANTE

As curvas mostradas na Figura 5.14 foram construídas a partir dos dados obtidos durante os ensaios descritos no item 4.3, realizados com a finalidade de se verificar uma possível influência do nitrito na determinação da atividade nitrificante. Nesta figura estão apresentadas as velocidades específicas de consumo de oxigênio,  $Q_{O_2}$ , obtidas para o ensaio onde o nitrito foi sendo acumulado, bem como a quantidade deste, e ainda o  $Q_{O_2}$  para o teste onde a medida foi realizada em meio livre de nitrito.



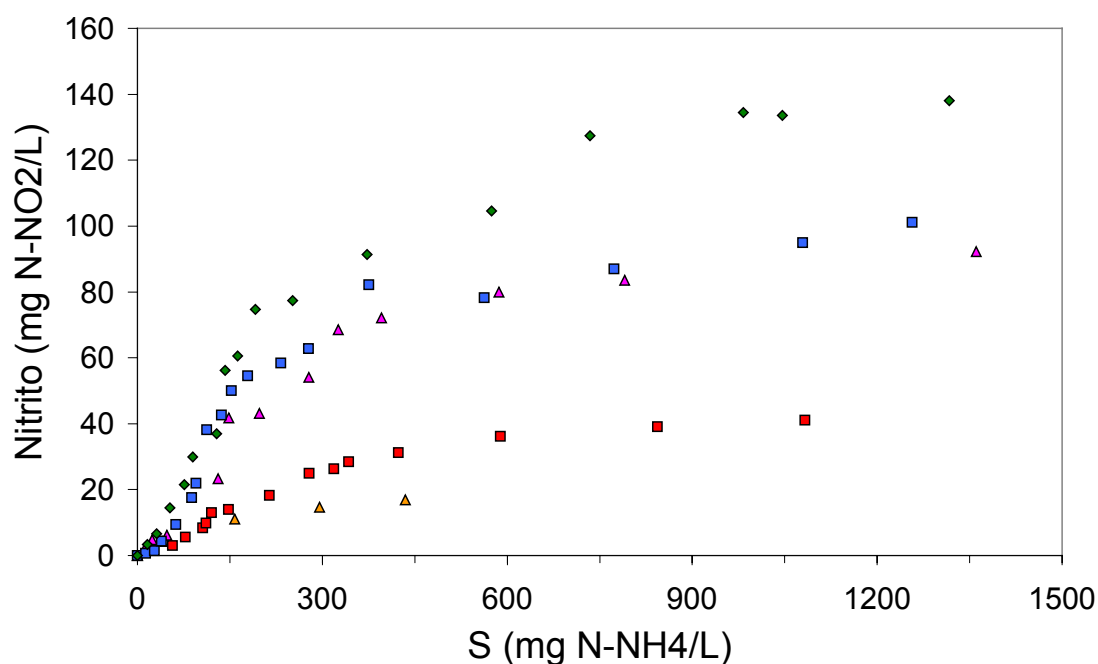
**Figura 5.14:** Influência do acúmulo de nitrito no meio sobre as velocidades específicas de respiração: (▲) Ausência de NO<sub>2</sub>; (◆) NO<sub>2</sub> presente; (●) N-NO<sub>2</sub> acumulado.

Pode-se notar pela Figura 5.14 que houve redução da velocidade específica de respiração a partir do momento em que o meio encontrava-se com aproximadamente 72mgN-NO<sub>2</sub>/L. MULLER *et al* (1995) reportaram uma redução da velocidade de oxidação de amônia à metade quando a faixa de nitrito foi elevada de 0 - 14 mg para 42 - 70 mg N-NO<sub>2</sub>. STEIN e ARP (1998) <sup>5</sup>*apud* KIELING (2004) sugeriram que a presença de nitrito em concentrações acima de 420mg/L (128 mg N-NO<sub>2</sub>/L) poderiam provocar inativação enzimática irreversível das bactérias amônio-oxidantes. De fato, a redução de Q<sub>O2</sub> observada, mesmo quando a medida foi realizada em presença de quantidades maiores de nitrito, não se apresentou de forma tão significativa quanto descrito na literatura. Considerando que o N-NH<sub>4</sub> já se encontrava em uma quantidade considerável (400mgN-NH<sub>4</sub>/L) quando houve a redução da atividade não se pode afirmar que a presença de nitrito foi a responsável pelo efeito inibitório sucedido. Pode-se mencionar ainda que devido a redução da atividade nitrificante não ser tão considerável quanto ao observado em outras pesquisas comprova que a resposta de uma determinada flora bacteriana à presença de inibidores é relativa, dependendo do histórico de desenvolvimento da mesma.

Procedeu-se o acompanhamento das concentrações de nitrito durante todos os ensaios mencionados no item 5.3. A Figura 5.15 apresenta somente as concentrações de nitrito determinadas nos ensaios realizados do 255° ao 293°. Observa-se, por esta figura, que, quanto maior a concentração celular, maiores concentrações de nitrito foram formadas. Esta constatação, aliada ao fato de que, para estes ensaios, quanto maior a concentração utilizada o efeito inibitório ocorrido foi menor, vide Figura 5.7, só corrobora com a afirmação anterior de que o nitrito formado não foi a causa principal do efeito inibitório observado.

---

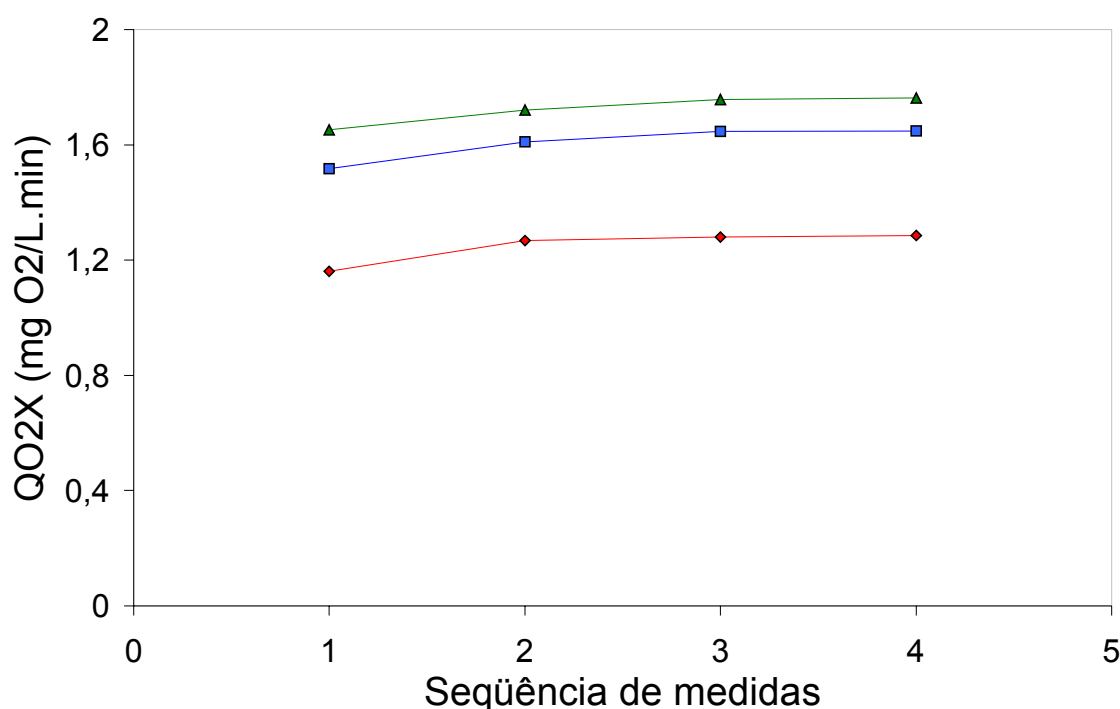
<sup>5</sup> STEIN, L. Y. & ARP, D. J.. "Loss of ammonia monooxygenase activity in *Nitrosomonas europaea* upon exposure to nitrito". Applied Environmental Microbiology, 64 (10), pp. 4098-4102. 1998.



**Figura 5.15:** Concentrações de nitrito obtidas para diferentes concentrações celulares: (▲)0,69 gSST/L; (■)1,20 gSST/L; (▲)2,65 gSST/L; (■)3,52 gSST/L; (◆)5,83 gSST/L.

## 5.5 REPRODUTIBILIDADE DA QUEDA DE OXIGÊNIO MEDIDA

A Figura 5.16 mostra as medidas de  $Q_{O_2}$  realizadas de forma sucessivas para cada concentração de amônia aplicada ao meio inicialmente livre deste substrato. CABEZAS (2004) reportou diferenças da ordem de 50% entre as determinações de atividade nitrificante realizadas de forma consecutivas, aplicando-se uma concentração de substrato de  $60 \text{ mg N-NH}_4^+/\text{L}$ , para um mesmo inóculo que havia permanecido sob aeração uma noite inteira em meio ausente de substrato.

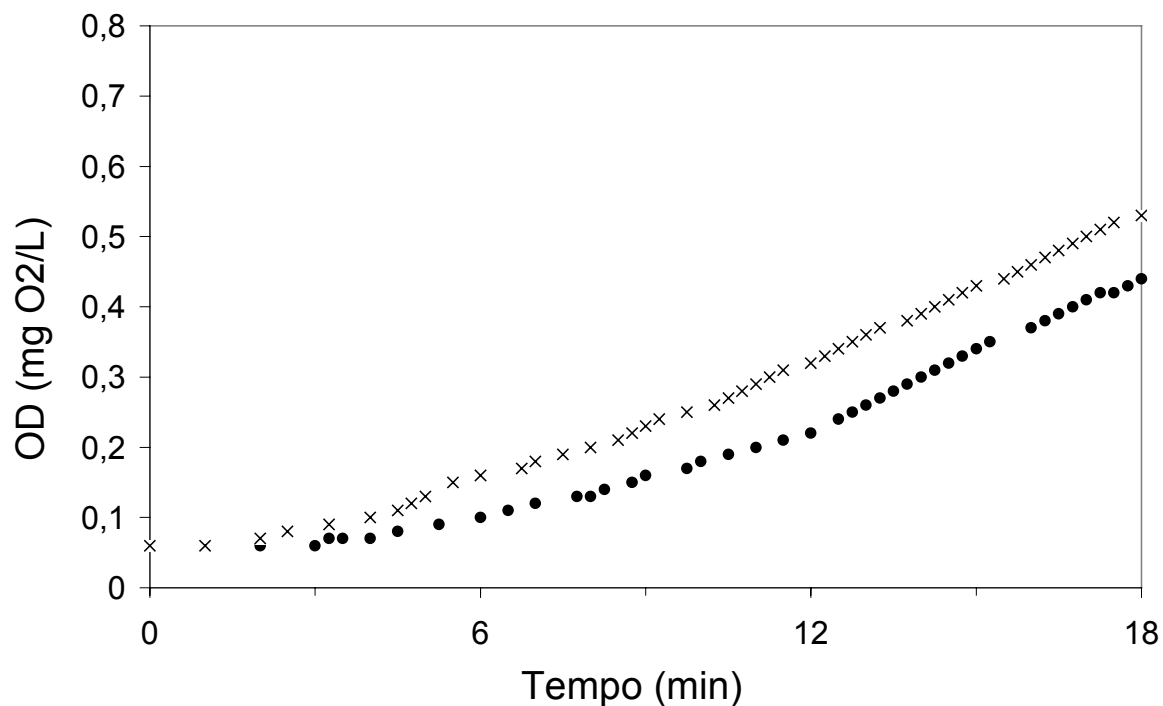


**Figura 5.16:** Seqüência de medidas de  $Q_{O_2}$  para diferentes concentrações de substrato:  
 (♦) 57,64 mgN-NH<sub>4</sub>/L; (■) 395,46 mgN-NH<sub>4</sub>/L; (▲) 640,25 mgN-NH<sub>4</sub>/L

Comparando-se os valores de  $Q_{O_2}$  obtidos para cada concentração de substrato utilizada verificou-se que houve uma diferença um pouco mais acentuada entre a primeira e a última queda medida, mas a magnitude desta foi da ordem de 10%. Pôde-se verificar ainda, que os valores de  $Q_{O_2}$  obtidos permaneceram praticamente constantes após a segunda medida. Nestes casos, portanto, é interessante que não se utilize o valor do primeiro  $Q_{O_2}$  obtido como medida da atividade, mas sim os valores constantes alcançados posteriormente. Nos ensaios em que se realiza o emprego de vários pulsos consecutivos de amônia este efeito pode ser desprezado, pois provavelmente este efeito somente irá ocorrer no pulso inicial.

## 5.6. DETERMINAÇÃO DO $K_{La}$

A Figura 5.17 mostra os acompanhamentos do aumento do oxigênio dissolvido na água e, no meio nutriente, em função do tempo, obtidos durante o ensaio realizado para a determinação do  $K_{La}$ .

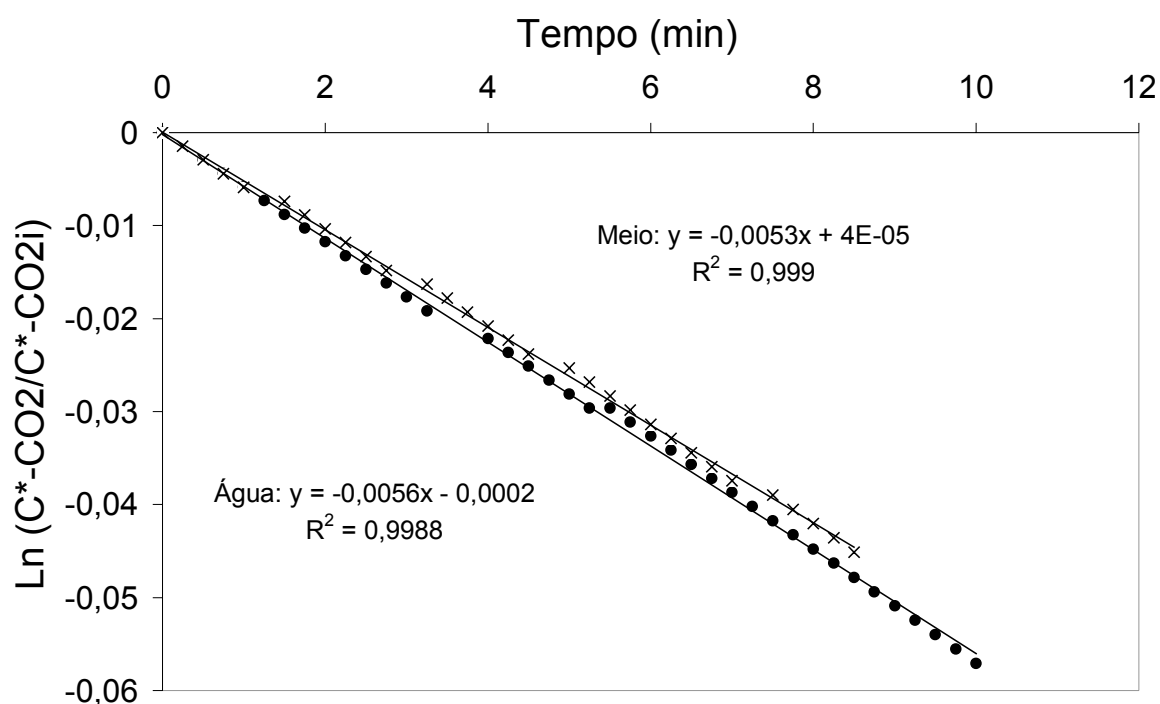


**Figura 5.17:** Curva de OD em função do tempo obtida em diferentes meios:

(●)água; (x)meio nutriente.

A Figura 5.18 apresenta os valores de  $\ln(C^*-C_{O_2})/(C^*-C_{O_{2i}})$  em função do tempo, utilizados para a determinação do valor do coeficiente volumétrico de transferência de oxigênio,  $K_La$ , segundo a Equação 4.6. Os valores de  $K_La$  obtido para a água e o meio estão apresentados na Tabela 5.5.





**Figura 5.18:** Curva de  $\text{Ln}(C^* - \text{CO}_2) / (C^* - \text{CO}_{2i})$  em função do tempo obtida para a determinação do  $K_{La}$ : (●) água; (x) meio nutriente.

Verifica-se que o comportamento relativo ao aumento de oxigênio dissolvido foi muito similar para ambos os casos. Pela Tabela 5.5 pode-se perceber que a transferência de oxigênio através da superfície do líquido no biorreator utilizado para os ensaios de atividade específica era suficientemente baixa a ponto de ser desprezada.

**Tabela 5.5:** Dados do coeficiente volumétrico de transferência de oxigênio obtidos para os ensaios.

Líquido utilizado	$K_{La} \text{ (min}^{-1}\text{)}$	$R^2$
Água	0,0056	0,9988
Meio Nutriente	0,0053	0,999

## 6. CONCLUSÕES

A metodologia proposta neste trabalho, baseada na determinação da cinética de consumo de oxigênio ao longo do tempo (respirometria), mostrou útil não somente na determinação de parâmetros cinéticos, mas também para a verificação de efeitos inibitórios ocasionados pela exposição da biomassa a altas concentrações de substrato. A sensibilidade do método mostrou-se capaz de representar a contento a dependência da atividade específica em relação ao histórico de desenvolvimento da biomassa. Esta sensibilidade é extremamente importante tendo-se em vista que as bactérias nitrificantes realmente apresentam-se muito susceptíveis a variações de toxidez no meio relacionadas à presença de compostos inibidores e à carga de substrato a que esta biomassa é exposta. A técnica ainda permitiu que se verificasse a capacidade de adaptação dos microrganismos pela tendência ao aumento de resistência aos efeitos inibitórios constatados. Desta forma a respirometria pode ser empregada para a caracterização e seleção de um inóculo de partida permitindo, ainda, um acompanhamento apropriado da desenvoltura de uma determinada flora nitrificante no sistema. A metodologia desenvolvida correspondeu às expectativas sendo esta executada com grande rapidez, praticidade e simplicidade, o que a torna uma ferramenta extremamente útil e de grande atratividade para aplicação em áreas diversas.

A relação  $S_0/X_0$  estudada mostrou que a faixa indicada para sua utilização em ensaios de atividade para lodos nitrificantes se apresenta entre  $50 < S_0/X_0 < 100$  mgN-NH<sub>4</sub>/gSSV. Esta relação é de grande interesse prático uma vez que se pode realizar a determinação da atividade em concentrações de substrato e de biomassa específicos para cada caso, garantindo a obtenção do seu valor máximo.

## 7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Em termos de realização da metodologia, poderia ser feito o seu aprimoramento através do acoplamento do sensor de oxigênio dissolvido à instrumentos de registro, facilitando a execução destes teste e promovendo uma melhor precisão sobre os resultados obtidos.

A fundamentação da metodologia empregada pode ser complementada ainda com estudos mais aprofundados sobre a influência do nitrito nos ensaios de atividade, uma vez que não se sabe ao certo qual o efeito inibitório que altas concentrações deste íon podem exercer sobre a medida da atividade específica à baixas concentrações de amônia.

Poderia estender-se o uso da metodologia aplicada para a determinação da atividade de microrganismos heterotróficos presentes no lodo de forma conjunta com a medida realizada para as bactérias nitrificantes.

Ainda seria interessante que se realizassem ensaios de forma a diferenciar a atividade das amônio-oxidantes em relação às nitrito-oxidantes, uma vez que novos processos empregando-se somente a nitrificação parcial vem sendo utilizados.

Ampliação do estudo sobre inibição, utilizando-se possíveis compostos inibidores encontrados em efluentes que são tratados através de sistemas nitrificantes.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, A. F.; CATUNDA, Y. S. C.; GUIMARÃES, P.; VAN HAANDEL, A.. “Uso da respirometria para a determinação experimental da cinética de nitrificação”. In: XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES). I-011. 2000.
- ABREU, L.M.. “Aspectos microbiológicos de lo processo de nitrificación-desnitrificación”, in: “III Taller Y Seminario Latino Americano: Tratamiento Anaerobio de Águas Residuales”, p. 55-64. Montevideú, Uruguai. 1994.
- APHA, AWWA, WEF.. “Standard methods for the examination of water and wastewater”, 19<sup>th</sup>. Edn. American Public Health Association. Washington, DC. 1995.
- ANDREWS, J. F.. “A mathematical model for the continuous culture of microorganisms utilizing inhibitory substrates”. *Biotechnology and Bioengineering* v. 10, p. 707-723. 1968.
- BAILEY, J. E. & OLLIS, D. F.. “Biochemical Engineering Fundamentals”, 2º Ed. McGraw Hill. Singapura. 1986.
- BARNES, D. & BLISS, P. J.. “Biological control of nitrogen in wastewater treatment”, Cambridge: University Press, 1983.
- BAVARESCO, A. S. L.. “Lagoas de aguapés no tratamento terciário de dejetos de suínos”. Dissertação de mestrado. Departamento de Engenharia de Produção. Universidade Federal de Santa Catarina, 1998.

- BENMOUSSA, H.; MARTIN, F. T.; RICHARD, Y.; LEPRINCE, A.. "Etude de l' inhibition de la nitrification par les composes organiques". Water Research, v. 20, p. 1465-1470. 1986.
- BITTON, G.. "Wastewater microbiology". John Wiley & Sons, inc. Publication. 1994.
- BROCK, T. D. & MADIGAN, M.T.. "Biology of Microorganisms". New Jersey. Prentice Hall. 1996.
- BROUWER, H.; KLAPWIJK, A.; KEESMAN, K. J., "Identification of activated sludge and wastewater characteristics using respirometric batch-experiments". Water Research, v. 32, p. 1240-1254. 1997.
- CAMPOS, J. L.; GARRIDO-FERNÁNDEZ, J. M.; MÉNDEZ, R.; LEMA, J. M.. "Nitrification at high ammonia loading rates in an activated sludge unit". Bioresource Technology, v. 68, p. 141-145. 1999.
- CARRERA, J.; JUBANY, I.; CARVALLO, L.; CHAMY, R.; JAVIER, L.. "Kinetic models for nitrification inhibition by ammonium and nitrite in a suspended and an immobilised biomass systems". Process Biochemistry, v. 39, p. 1159-1165. 2004.
- CATALDO, D. A.; HAROON, M.; SCHRADER, L. E.; YOUNGS, V. L. "Rapid colorimetric determination of nitrate in plant tissue by nitration of salicylic acid". Comum Soil Sci Plant Anal. 6:71-80. 1975.
- CHANG, J.; CHUDоба, P.; CAPDEVILLE, B.. "Determination of the maintenance requereiments of activated sludge". Water Science Technology, v 28, p. 139-142. 1993.
- CHARLEY, R. C.; HOOPER, D. G.; MCLEE, A.G.. "Nitrification kinetics in activated sludge at various temperatures and dissolved oxygen concentrations". Water Research, v. 14, p. 1387-1396. 1980.

- CUI, R.; CHUNG, W.; JAHNG, D.. “A rapid and simple respirometric biosensor with immobilized cells of *Nitrosomonas europaea* for detecting inhibitors of ammonia oxidation”. Biosensors & Bioelectronics, 2004.
- DAVIES, P. S.; “The role of respirometry in maximising aerobic treatment plant efficiency”. Strathkelvin Instruments Ltd.
- DURÁN, J. Remoção biológica de nutrientes (NeP). In: IV Curso de tratamento biológico de resíduos. Santa Catarina, Florianópolis: UFSC, 1999.
- EPA – U.S. Environmental Protection Agency – Technology Transfer. Process design manual for nitrogen control. Washington – U.S.A., 1975.
- FARIAS, O. L. V.. “Processos biológicos de tratamento de efluentes: Remoção de Nutrientes”. Apostila. Laboratório de Controle de Poluição, Rio Grande do Sul, 2000.
- FERNANDES, J. G. S.; VAN HAANDEL, A.; CAVALCANTI, P. F. F.; COURA, L. R.. “Utilização da respirometria no controle operacional de sistemas aeróbios de tratamento de águas residuárias – A experiência da CETREL”. Engenharia Sanitária e Ambiental. v. 6, p.131-137. 2001.
- FERREIRA, E. S.. “Cinética química e fundamentos dos processos de nitrificação e denitrificação biológica”. In: XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES). I-121. 2000.
- FERREIRA, E. D. S.. “Aplicação da respirometria na caracterização do esgoto doméstico afluente a uma ETE por processo de lodos Ativados”. Dissertação de Mestrado. Programa de pós-graduação em tecnologia ambiental e recursos hídricos, Universidade de Brasília, 2002.

- FURIGO, A.; PARK, S. W.. “Modelagem e Simulação de Processos”.In: V Curso de Tratamento Biológico de Resíduos. Florianópolis, SC. 2005.
- GRAY, N. F.. “Biology of Wastewater Treatment”. Oxford University Press. New York, US. 1992.
- GRADY JR., C.P.L., SMETS, B. F.; BARBEAU, D. S.. “Variability in kinetics parameter estimates: a review of possible causes and a proposed terminology”. Water Research, v. 30 (3), p. 742-748. 1996.
- GRUNDITZ, C.; DALHAMMAR, G.. “Development of nitrification inhibition assays using pure cultures of *nitrosomonas* and *nitrobacter*”. Water Research, v. 3 (2), p. 433-440. 2001.
- HAGOPIAN, D. S. & RILEY, J. G.. “A closer look at the bacteriology of nitrification”. Aquacultural engineering, v. 18, p. 223-244. 1998.
- HARTINGER, L.. “Handbook of effluent treatment and recycling for the metal finishing industry”. ASM International, Finishing Publications LTD, 2º Ed., 1994.
- HENZE, M.; HARREMOES, P.; ARVIN, E.; JANSSEN, J. C.. “Wastewater treatment: Biological and chemical processes”. 2º Ed., Springer, N.Y., U.S.A.. 1997.
- HUANG, J-S.; WU, C-H.; JIH, C-G.; CHEN, C-T.. “Effect of addition of *rodhobacter* sp. To activated sludge reactors treating piggery wastewater”. Water Research, v. 35 (16), p.3867-3875. 2001.
- INTERNATIONAL ASSOCIATION ON WATER QUALITY (IAWQ). “Respirometry in control of the activated sludge process: principles”. Technical Report nº 7. 1998.

JENKINS, D.; HERMANOWICZ, S. W.. "Principles of chemical phosphate removal. In: Phosphorus and nitrogen removal from municipal wastewater – principles and practice . 2º Ed. Lewis Publishers, N.Y.,1991.

JETTEN, M. S. M.; HORN, S. J.; VAN LOOSDRECHT, M. C. M.. "Towards a more sustainable municipal wastewater treatment system". Water Science Technology. V. 35, p. 171-180. 1997.

KIELING, D.D.. "Estudo da remoção Biológica de nitrogênio a partir de lodo nitrificante cultivado em meio autotrófico sob condições anóxicas". Dissertação de Mestrado. Programa de pós-graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina. 2004.

KUAI, L. & VERSTRAETE, W.. "Ammonium removal by the oxygen-limited autotrophic nitrification-denitrification system". Applied and Environmental Microbiology, p. 4500-4506. 1998.

LIAO, P.H.; CHEN, A.; LO, K.V.. "Removal of nitrogen from swine manure wastewaters by ammonia stripping". Bioresource Technology, v. 54, 1995.

LIU, Y.. "Bioenergetic interpretation on the  $S_0/X_0$  ratio in substrate-sufficient batch culture". Water Research, v. 30, p. 2166-2770. 1996.

LIU, Y.; CHEN, G.; PAUL, E.. "Effect of the  $S_0/X_0$  Ratio on Enegy Uncoupling in Substrate-Sufficient Batch Culture of Activated Sludge". Water Research, v. 32, p. 2883-2888. 1998.

LOUREIRO, M. E.. "Assimilação do Nitrogênio". Material didático de apoio à disciplina BVE 270:  
[www.ufv.br/dbv/pgfvg/Bve%20270/pdf/Metabolismo\\_nitrogenio.pdf](http://www.ufv.br/dbv/pgfvg/Bve%20270/pdf/Metabolismo_nitrogenio.pdf)



- LUONG, J. H. T.. “Generalization of Monod kinetics for analysis of Growth data with substrate inhibition”. *Biotechnology and Bioengineering*, v. 29, p. 242-248. 1986.
- ISOLDI, L. A., KOETZ, P. R.. “Tratamentos biológicos para remoção de matéria carbonada e nitrogenada”. *Rev. Eletrônica do Mest. Educ. Ambient.*, V12, 2004.
- MARSILI-LIBELLI, S.; TABANI, F.. “Accuracy analysis of a respirometry for activated sludge dynamic modelling”. *Water research*, v.36, p. 1181-1192. 2002.
- METCALF & EDDY. Inc. “Wastewater Engineering: Treatment, disposal and reuse”. McGraw Hill, 2º Ed., N. Y..1991.
- MORENO, G.; CRUZ, A.; BUITRÓN, G.. “Influence of S0/X0 ratio on anaerobic biodegradability test”. In: “V Taller Y Seminario Latino Americano: Tratamiento Anaerobio de Águas Residuales”, Chile. 1998.
- MORVAI, L.; MIHÁLZ, P.; HOLLÓ, J.. “Comparison of the kinetics of acetate biomethanation by raw and granular sludge”. *Applied and Microbiology Biotechnology*, v. 36, p. 561 – 567. 1992.
- ORHON, D. & ARTAN, N.. “Modelling of Activated Sludge Systems”. Technomic Publishing Company, Lancaster, Pennsylvania USA. 1994.
- PÁDUA, H. B.. “A necessária presença do nitrogênio em sistemas aquáticos” <http://www.aquiculturafb.hpg.ig.com.br/necessaria.htm>. Acesso Abril 2003.
- PELCZAR, M.; REID, R.; CHAN, E. C. S.. “Microbiologia”. V. 2. Ed. McGraw Hill, São Paulo. 1981.
- PHILIPS, A. M. L.. “Desenvolvimento de Testes de Atividade Específica de Bactérias Nitrificantes” Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Santa Catarina. 2002.

- POLLICE, A.; TANDOI, V.; LESTINGI, C.. “Influence of aeration and sludge retention time on ammonium oxidation to nitrite and nitrate”. *Water Research*, v. 36, p. 2541-2546. 2001.
- ROS, M.. “Respirometry of activated sludge”. Technomic Publishing Company, Lancaster, Pennsylvania. 1993.
- SARACCO, G.; GENON, G.. “High temperature ammonia stripping and recovery from process liquid wastes”. *Journal of Hazardous Materials*, v. 37, 1994.
- SCHMIDELL, W.. “Agitação e aeração em biorreatores”. In: SCHMIDELL, W.; LIMA, U. A.; AQUARONE, E.; BORZANI, W.. “Biotecnologia Industrial”. v. 2, Edgard Blücher Ltda., p. 277-331. 2001.
- SCHMIDELL, W.. “Remoção Biológica de Nitrogênio de Efluentes Líquidos” Relatório Técnico, Universidade Federal de Santa Catarina. 2003.
- SCHMIDELL, W.; REGINATTO, V. S.. “Remoção de Nitrogênio”. In: V Curso de Tratamento Biológico de Resíduos. Florianópolis, SC. 2005.
- SCHMIDT, I.; SLIEKERS, O.; SCHMIDT, M.; BOCK, E.; FUERST, J.; KUENEN, J. G.; JETTEN, M. S. M.; STROUS, M.. “New concepts of microbial treatment processes for the nitrogen removal in wastewater”. *FEMS Microbiology Reviews*. v. 27, p. 481-492. 2003.
- SOARES, H. M.. “Remoção de nutrientes de efluentes de processos agro-industriais para fins de reutilização”. Projeto de pesquisa apresentado ao CNPQ dentro do programa de cooperação bilateral – Brasil e Alemanha. 1999.
- SOARES, H. M.. “Especialização em Processos Têxteis”. Apostila do Curso de Pós-Graduação – UFSC/SENAI, 1999.
- STENSEL, H.; BANARD, J. L.. “Principles of biological nutrient removal”. In: RANDALL, C. W.; BANARD, J. L.; STENSEL, H.. ed. “Design and retrofit of

- wastewater treatment plants for biological nutrient removal". Pennsylvania. Lancaster, v. 5, cap. 2, p.25-84. 1992.
- TANYOLAÇ, D.; SALIH, B.; TANYOLAÇ, A.. "Inhibition kinetics of a commercial mixed culture by ammonium sulfate". Biochemical Engineering Journal, v. 7, p. 177-182. 2000.
- TEBBUTT, T. H. Y. "Principles of Water Quality Control" . 4º ed. Oxford, Inglaterra: Pergamon, 1992. p.16.
- TIEDJE, J. M.. "Denitrification. Methods of soil Analysis, part 2. Chemical and Microbiological Properties". Agronomy Monograph, n. 9., 2 Ed. USA .1986.
- VAN HAANDEL, A. & MARAIS, G.. "O comportamento do sistema de lodo ativado: Teoria e aplicações para projeto e operação". Universidade Federal da Paraíba. 1999.
- VOGUEL, A. I.. "Análise Inorgânica Quantitativa". 4º Ed., Guanabara, RJ. 1981.
- VOLSKAY JR., V. T.; GRADY JR., C. P. L.. "Toxicity of selected RCRA compounds to activated sludge microorganisms". Research Journal WPCF 62:5. 1988.
- VON SPERLING, M.. "Princípios básicos do tratamento de esgotos". Vol. 2. Editora FCO. UFMG. Belo Horizonte. Minas Gerais. 1996.
- VON SPERLING, M.. "Princípio do Tratamento Biológico de Águas Residuárias – Lodos Ativados". Vol. 4. 2ª edição. Editora FCO. UFMG. Belo Horizonte. Minas Gerais. 1997.
- YE, R.W.; THOMAS, S. M.. "Microbial nitrogen cycles: physiology, genomics and application". Current Opinion in Microbiology, 4 pp. 307-312. 2001.

WIESMANN, U.. “Biological nitrogen removal from wastewater”. In: Fletcher, A. (Ed) “Advances in biochemical engineering”. v. 51, Springer-Verlag, Berlin. p. 113-154. 1994.

WATER POLLUTION CONTROL FEDERATION, Orris E. Albertson (Chairman). Nutrient Control. Manual of practice N°. FD-7. Prepared by task force on nutrient control. 1991.

## **ANEXOS e APÊNDICES**

## ANEXO

Categorização das classes mencionadas no item 3.3, segundo usos preponderantes no Território Nacional :

⇒ Classe 1: Águas destinadas ao abastecimento doméstico após tratamento simplificado; à proteção das comunidades aquáticas; à recreação de contato primário; à irrigação de hortaliças que são consumidas cruas e de frutas que se desenvolvam rentes ao solo e que sejam ingeridas cruas sem remoção de película e à criação natural e/ou intensiva (aquicultura) de espécies destinadas à alimentação humana.

⇒ Classe 2: Águas destinadas ao abastecimento doméstico, após tratamento convencional; à proteção das comunidades aquáticas; à recreação de contato primário (esqui aquático, natação e mergulho); à irrigação de hortaliças e plantas frutíferas; à criação natural e/ou intensiva (aquicultura) de espécies destinadas à alimentação humana; ao abastecimento doméstico, após tratamento convencional; à irrigação de culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras e à dessedentação de animais.

⇒ Classe 3: Águas destinadas ao abastecimento doméstico, após tratamento convencional; à irrigação de culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras e à dessedentação de animais.

⇒ Classe 5: Águas salinas destinadas à recreação de contato primário; à proteção das comunidades aquáticas e à criação natural e/ou intensiva (aquicultura) de espécies destinadas à alimentação humana.

⇒ Classe 7: Águas salobras destinadas à recreação de contato primário; à proteção das comunidades aquáticas; à criação natural e/ou intensiva (aquicultura) de espécies destinadas à alimentação humana e à recreação de contato secundário.

## APÊNDICE 1

Acompanhamento analítico do reator nitrificante durante o período de operação.

Data (d/m)	Tempo (dia)	Entrada	Saída				Conversão (%)
		N-NH <sub>4</sub> (mg.L <sup>-1</sup> )	N-NH <sub>4</sub> (mg.L <sup>-1</sup> )	N-NO <sub>2</sub> (mg.L <sup>-1</sup> )	N-NO <sub>3</sub> (mg.L <sup>-1</sup> )	pH	
11/mar	1	261,13	62,47	6,64	11,10		4,25
13/mar	3	261,63	0,74	1,33	70,10	6,41	26,85
16/mar	6	261,63	2,85	1,78	88,50		33,83
17/mar	7	317,21	0,60	1,22	102,68	6,68	39,25
18/mar	8	342,23	1,18	1,72	118,77	6,66	37,44
19/mar	9	342,23	0,70	1,22	139,85	6,98	40,86
23/mar	13	317,99	0,75	1,10	151,35	7,03	44,22
24/mar	14	317,99	1,16	2,17	163,61	6,79	51,45
25/mar	15	420,59	1,82	1,78	181,90	6,5	57,20
26/mar	16	411,28	9,22	2,96	219,33	6,68	52,15
30/mar	20	411,28	0,35	1,78	225,97	6,76	54,94
31/mar	21	404,04	0,41	1,72	199,14	6,85	48,42
1/abr	22	404,04	0,42	1,95	199,14	6,85	49,29
2/abr	23	404,04	0,42	1,50	243,21	7,2	60,20
7/abr	28	404,04	0,40	1,67	190,96	6,52	47,26
14/abr	35	440,24	0,78	1,78	317,94	6,72	72,22
16/abr	37	440,24	0,55	1,61	323,69	6,83	73,53
20/abr	41	530,36	0,56	1,61	325,61	7	61,39
22/abr	43	530,36	0,47	1,38	356,26	6,81	67,17
27/abr	48	517,52	0,45	1,61	386,92	7,06	74,76
30/abr	51	494,82	0,40	1,89	434,82	6,38	87,88
4/mai	55	606,27	0,33	1,95	436,74	6,85	72,04
6/mai	57	606,27	0,26	1,55	476,98	7,25	78,67
7/mai	58	675,08	0,42		478,89	6,46	78,99
11/mai	62	892,89	0,52	1,38	515,30	5,6	57,71
14/mai	65	810,15	20,18		584,28	8	59,89
18/mai	69	928,03	0,56	2,12	630,27	7,4	67,91
20/mai	71	1022,81	0,64	2,00	701,16	5,67	68,55
27/mai	78	1011,35	0,71	4,25	676,92	7,5	66,93
28/mai	79	1011,35	0,61		733,74	7,52	72,55
3/jun	85	990,02	0,45	2,51	912,27	6,64	92,15
8/jun	90	913,81	0,33	2,28	890,33	7,56	97,43
9/jun	91	913,81	0,28		714,79	7,37	78,22
10/jun	92	913,81	0,28	1,95	791,59	7,62	86,62
11/jun	93	997,63	0,26		696,51	6,92	76,22
15/jun	97	997,63	0,30	1,55	861,07	6,76	86,31
16/jun	98	997,63	0,23		787,93	7,25	78,98
17/jun	99	997,63	0,33	1,67	776,96	7,65	77,88
18/jun	100	997,63	0,42		802,56	6,52	80,45
22/jun	104	923,58	0,45	1,83	857,42	7,46	92,84
23/jun	105	923,58	0,23	1,61	872,04	7,53	94,42
24/jun	106	923,58	0,33	1,50	868,39	7,53	94,02
29/jun	111	994,18	0,38	1,27	803,16	7,54	80,79
30/jun	112	929,02	0,30	1,22	799,86	6,89	80,45
1/jul	113	929,02	0,38	1,22	803,16	7,45	86,45
6/jul	118	1136,34	0,56	1,89	796,57	6,68	85,74
7/jul	119	1136,34	0,38		776,79	7,58	68,36
8/jul	120	1136,34	0,19	1,78	832,83	7,56	73,29

### APÊNDICE 1 (Continuação)

Acompanhamento analítico do reator nitrificante durante o período de operação.

Data (d/m)	Tempo (dia)	Entrada	Saída				Conversão (%)
		N-NH <sub>4</sub> (mg.L <sup>-1</sup> )	N-NH <sub>4</sub> (mg.L <sup>-1</sup> )	N-NO <sub>2</sub> (mg.L <sup>-1</sup> )	N-NO <sub>3</sub> (mg.L <sup>-1</sup> )	pH	
9/jul	121	1136,34	0,28		829,54	7,08	73,00
13/jul	125	896,93	0,42	1,72	819,65		91,38
14/jul	126	896,93	0,52	1,78	813,05	7,46	90,65
15/jul	127	896,93	0,49	1,72	809,76	7,42	90,28
20/jul	132	849,54	0,87	1,78	809,76		95,32
21/jul	133	849,54	0,78	1,83	786,68	7,58	92,60
22/jul	134	959,12	0,49	1,72	783,38		92,21
23/jul	135	980,54	0,75	1,83	829,54	6,89	86,49
26/jul	138	980,54	51,63	1,83	793,27		80,90
29/jul	141	843,31	1,18	1,83	615,24	5,9	72,96
30/jul	142	843,31	0,94	2,06	829,54	5,65	98,37
2/ago	145	843,31	1,01	1,95	846,02	7,34	100,32
4/ago	147	921,31	0,73	1,72	869,10	7,24	94,33
5/ago	148	921,31	0,99	1,83	885,58	7,2	96,12
12/ago	155	968,70	1,87	3,41	852,61		88,02
18/ago	161	945,00	8,43		743,82	9,26	76,23
19/ago	162	945,00	10,79	8,41	592,17	9,18	62,66
23/ago	166	982,91	10,37	5,21	493,26	6,76	52,20
25/ago	168	982,91	5,02	3,86	840,53		85,51
26/ago	169	982,91	2,27	3,86	851,48	7,3	86,63
30/ago	173	968,70	5,16		766,90	7,54	79,17
31/ago	174	1032,67	1,56	3,13	839,43	6,56	86,66
2/set	176	1032,67	1,23	2,26	950,25	7,17	92,02
3/set	177	1032,67	1,20		964,30	6,52	93,38
7/set	181	1046,89	1,92	1,77	947,43	7,54	90,50
9/set	183	1046,89	0,59	1,63	1043,03	7,56	99,63
14/set	188	1051,63	0,68	4,51	1009,29	7,42	95,97
15/set	189	1023,19	0,61	1,34	1003,67	7,5	95,44
16/set	190	1023,19	0,94	8,17	983,98		96,17
20/set	194	1061,10	1,09	7,89	947,43	7,2	92,60
23/set	197	1061,10	1,37	8,38	975,55	7,02	91,94
24/set	198	1061,10	2,18		992,42	7,58	93,53
29/set	203	1080,06	1,01	2,96	991,08	7,25	91,76
30/set	204	1080,06	0,97		1010,86	7,12	93,59
2/out	206	1056,37	1,13	2,79	1014,16	7,56	96,00
4/out	208	1056,37	1,16		1017,45		96,32
5/out	209	1056,37	0,97	2,06	948,22	7,56	89,76
7/out	211	1027,93	1,58	2,17	977,89	7,36	95,13
10/out	214	1027,93	1,04	2,17	1017,45		98,98
11/out	215	923,68	0,75	1,83	1010,86	7,53	98,34
12/out	216	923,68	0,80	1,89	911,96	7,35	98,73
13/out	217	923,68	0,90	1,61	905,36	7,43	98,02
14/out	218	923,68	1,11	1,83	918,55	7,5	99,44
15/out	219	923,68	0,99	2,00	892,18	7,56	96,59
16/out	220	923,68	0,92	1,38	898,77		97,30
17/out	221	923,68	0,80	1,27	918,55	7,55	99,44
18/out	222	923,68	0,99	1,95	911,96		98,73
19/out	223	923,68	1,28	1,55	885,58	7,5	95,88



### APÊNDICE 1 (Continuação)

Acompanhamento analítico do reator nitrificante durante o período de operação.

Data (d/m)	Tempo (dia)	Entrada	Saída				Conversão (%)
		N-NH <sub>4</sub> (mg.L <sup>-1</sup> )	N-NH <sub>4</sub> (mg.L <sup>-1</sup> )	N-NO <sub>2</sub> (mg.L <sup>-1</sup> )	N-NO <sub>3</sub> (mg.L <sup>-1</sup> )	pH	
20/out	224	864,44	1,61		869,10	7,25	94,09
21/out	225	864,44	0,97	1,55	806,46	7,24	93,29
22/out	226	864,44	3,36		819,65	7,52	94,82
25/out	229	911,83	0,75		885,58	7,85	97,12
26/out	230	911,83	1,13	1,67	865,80	7,78	94,95
27/out	231	911,83	3,10		855,91	7,85	93,87
28/out	232	881,03	0,71	1,55	839,43	7,15	92,06
29/out	233	881,03	0,59		862,50	7,26	97,90
30/out	234	881,03	0,97	2,12	875,69		99,39
3/nov	238	999,50	0,99		968,00	6,98	96,85
4/nov	239	999,50	1,11	1,44	954,81	7,3	95,53
5/nov	240	999,50	1,04		994,38	6,25	99,49
8/nov	243	1013,72	0,66		992,79	7,55	97,94
9/nov	244	1013,72	0,80	2,68	982,32	7,56	96,90
11/nov	246	1025,56	0,97	2,00	971,85	7,5	94,76
13/nov	248	1025,56	1,09		975,34		95,10
18/nov	253	997,13	0,99	1,53	989,30	7,65	99,21
19/nov	254	997,13	1,09		989,30	7,52	99,21
20/nov	255	997,13	0,80	1,40	961,38	7,52	96,41
24/nov	259	982,91	0,85	1,57	877,61	6,48	89,29
25/nov	260	982,91	1,09		929,96	7,46	94,61
30/nov	265	1006,61	0,80	1,36	919,49	7,56	91,90
1/dez	266	1006,61	3,36		926,47	7,46	92,04
2/dez	267	1006,61	1,01	1,53	929,96	7,26	92,39
8/dez	273	1044,52	1,44	1,57	1020,72	7,46	97,72
9/dez	274	1044,52	1,75		1017,22	7,53	97,39
10/dez	275	983,28	0,49	1,66	1006,75	7,62	96,38
15/dez	280	1006,94	0,42		1003,26	7,65	99,64
16/dez	281	1006,94	0,37	1,18	971,85	7,68	96,52
17/dez	282	1006,94	0,35		992,79		98,60
18/dez	283	966,72	0,13		1010,24	7,51	100,33
19/dez	284	966,72	0,91	1,40	947,09	7,58	97,97
20/dez	285	966,72	0,61		940,75	7,65	97,31
21/dez	286	966,72	1,53	1,27	931,25	7,46	96,33
22/dez	287	966,72	1,51		962,92	7,52	99,61
23/dez	288	980,91	0,91	1,53	947,09		97,97
24/dez	289	980,91	1,10		966,09	7,5	98,49
25/dez	290	980,91	0,77	1,18	959,75		97,84
26/dez	291	980,91	0,58		953,42		97,20
27/dez	292	980,91	0,77	1,27	972,42	7,58	99,13
28/dez	293	980,91	1,84	1,49	966,09	7,56	98,49

## APÊNDICE 2

**Tabela 2A:** Variação da concentração de OD ao longo do tempo, obtido para a determinação da atividade nitrificante no 7º dia de operação.

Concentração celular: SST = 1,83 g/L; SSV = 0,79 g/L

Endógena		1º Pulso		2º Pulso		3º Pulso		4º Pulso		5º Pulso		6º Pulso		7º Pulso		8º Pulso	
Tempo	OD	Tempo	OD	Tempo	OD	Tempo	OD	Tempo	OD	Tempo	OD	Tempo	OD	Tempo	OD	Tempo	OD
(min)	(mgO <sub>2</sub> /L)	(min)	(mgO <sub>2</sub> /L)	(min)	(mgO <sub>2</sub> /L)	(min)	(mgO <sub>2</sub> /L)	(min)	(mgO <sub>2</sub> /L)	(min)	(mgO <sub>2</sub> /L)	(min)	(mgO <sub>2</sub> /L)	(min)	(mgO <sub>2</sub> /L)	(min)	(mgO <sub>2</sub> /L)
0	7,8	0	6,9	0	6,7	0	7	0	6,8	0	6,6	0	6,8	0	6,5	0	6,4
1,5	7,2	0,5	6,6	0,5	6,4	0,5	6,7	0,5	6,7	0,5	6,4	1	6,6	0,5	6,2	1	6,3
2,5	7,1	1	6,6	1	6,3	1	6,5	1	6,6	1	6,3	1,5	6,5	1	5,9	1,5	6,2
3	7,1	1,5	6,5	1,5	6,1	1,5	6,4	1,5	6,6	1,5	6,2	2	6,5	1,5	5,8	2	6,1
4,5	7	2	6,5	2	6,1	2	6,3	2	6,5	2	6,1	2,5	6,5	2	5,7	2,5	6
5	7	2,5	6,5	2,5	6,1	2,5	6,2	2,5	6,5	2,5	6,1	3	6,4	2,5	5,7	3	6
6	6,9	3	6,5	3	6	3	6,1	3	6,4	3	6	3,5	6,3	3	5,6	3,5	5,8
8,5	6,8	4	6,2	3,5	5,9	3,5	6,1	3,5	6,3	3,5	5,9	4	6,2	3,5	5,5	4	5,8
9	6,8	4,5	6,3	4	5,9	4	5,9	4	6,3	4	5,8	4,5	6,1	4	5,5	4,5	5,7
10,5	6,7	5	6,1	4,5	5,9	4,5	5,9	4,5	6,2	4,5	5,7	5	6	4,5	5,4	5	5,6
11	6,7	5,5	6	5	5,8	5	5,9	5	6,1	5	5,6	5,5	6	5	5,3	5,5	5,5
12	6,6	6	5,9	5,5	5,8	5,5	5,8	5,5	6,1	5,5	5,6	6	5,9	5,5	5,2	6	5,5
13	6,6	6,5	5,8	6	5,7	6	5,7	6	6	6	5,5	6,5	5,8	6	5,1	6,5	5,4
14	6,5	7	5,8	6,5	5,7	6,5	5,6	6,5	5,9	6,5	5,3	7	5,8	6,5	5,1	7	5,3
15	6,5	7,5	5,7	7	5,6	7	5,5	7	5,9	7	5,3			7	5	7,5	5,2
		8	5,6	7,5	5,6	7,5	5,5	7,5	5,8	7,5	5,2			7,5	4,9	8	5,2
		8,5	5,5	8	5,5	8	5,4	8	5,7	8	5,1			8	4,8	8,5	5,1
		9	5,4	8,5	5,5	8,5	5,3	8,5	5,7	8,5	5			8,5	4,8	9	5
		9,5	5,3	9	5,4	9	5,2	9	5,6					9	4,7	10	4,9
		10	5,2	9,5	5,3	9,5	5,2	9,5	5,5								
				10	5,3	10	5,1	10	5,5								







## APÊNDICE 5

**Tabela 5A:** Variação da concentração de OD ao longo do tempo, obtido para a determinação da atividade nitrificante no 214º dia de operação.

Concentração celular: SST=0,53g/L															
Endógena		1º Pulso		2º Pulso		3º Pulso		4º Pulso		5º Pulso		6º Pulso		7º Pulso	
Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)
0	6,38	0	6,6	0	6,6	0	6,59	0	6,49	0,5	6,66	0	6,4	1	6,35
0,5	6,37	0,5	6,58	0,5	6,55	0,5	6,5	0,5	6,43	1	6,54	0,5	6,31	2	6,17
1	6,36	1	6,54	1	6,51	1	6,44	1	6,39	1,5	6,47	1	6,22	2,5	6,1
1,5	6,36	1,5	6,51	1,5	6,48	1,5	6,41	1,5	6,33	2	6,42	1,5	6,16	3	6
2	6,35	2	6,49	2	6,44	2	6,36	2	6,29	2,5	6,38	2	6,09	3,5	5,95
3	6,34	2,5	6,48	2,5	6,4	2,5	6,3	3	6,18	3	6,3	2,5	6	4	5,88
3,5	6,33	3	6,45	3	6,36	3	6,24	3,5	6,12	3,5	6,25	3	5,95	4,5	5,81
4	6,32	3,5	6,41	3,5	6,32	3,5	6,2	4	6,06	4	6,2	3,5	5,89	5	5,76
4,5	6,31	4	6,38	4	6,28	4	6,16	4,5	5,98	4,5	6,14	4	5,82	5,5	5,69
5	6,3	4,5	6,35	4,5	6,24	4,5	6,11	5	5,92	5	6,08	4,5	5,74	6	5,54
5,5	6,28	5	6,32	5	6,2	5	6,05	5,5	5,89	5,5	5,99	5	5,66		
6	6,27	5,5	6,29	5,5	6,16	5,5	5,99	6	5,83	6	5,94	5,5	5,59		
6,5	6,25	6	6,27	6	6,12	6	5,95	11º Pulso							
7	6,24	6,5	6,24												
7,5	6,23	8º Pulso		9º Pulso		10º Pulso		Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	12º Pulso		13º Pulso		14º Pulso	
8	6,22	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	0	6,54	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)
8,5	6,2	0,5	6,47	0	6,62	0	6,67	0,5	6,48	0	6,62	0	6,58	0	6,23
9	6,19	1	6,38	0,5	6,53	0,5	6,55	1	6,43	0,5	6,59	0,5	6,53	0,5	6,2
9,5	6,18	1,5	6,24	1	6,42	1	6,49	1,5	6,38	1	6,52	1	6,51	1	6,17
10	6,17	2	6,17	1,5	6,36	1,5	6,52	2	6,32	1,5	6,48	1,5	6,48	1,5	6,15
10,5	6,15	2,5	6,12	2	6,25	2,5	6,27	2,5	6,27	2	6,44	2	6,44	2	6,11
11	6,14	3	6,08	2,5	6,17	3	6,22	3	6,21	3	6,37	2,5	6,39	2,5	6,08
11,5	6,13	3,5	5,98	3	6,12	3,5	6,19	3,5	6,16	3,5	6,33	3	6,36	3,5	6,02
12	6,12	4	5,91	3,5	6,08	4	6,13	4	6,11	4	6,29	4	6,29	4	6
		4,5	5,84	4	6,03	4,5	6,09	4,5	6,06	4,5	6,25	4,5	6,26	5	5,96
		5	5,78	4,5	5,96	5	6,04	5	6,03	5	6,2	5	6,2	5,5	5,93
		5,5	5,7	5	5,9	5,5	5,95	5,5	5,97	5,5	6,18	5,5	6,16	6	5,89
		6	5,63	5,5	5,83	6	5,88	6	5,94	6	6,15	6	6,12		

## APÊNDICE 6

**Tabela 6A:** Variação da concentração de OD ao longo do tempo, obtido na determinação da atividade nitrificante no 216º dia de operação.

Concentração celular: SST = 1,56 g/L															
Endógena		1º Pulso		2º Pulso		3º Pulso		4º Pulso		5º Pulso		6º Pulso		7º Pulso	
Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)
0	7,01	0	7,18	0	6,86	0	6,98	0	7,12	0	6,67	0	6,79	0	6,62
0,5	6,98	0,5	7,15	0,5	6,63	1	6,55	0,5	6,78	0,5	6,49	0,5	6,37	0,5	6,26
1	6,95	1	7,03	1	6,52	1,5	6,4	1	6,61	1	6,3	1	6,13	1	5,97
1,5	6,92	1,5	6,93	1,5	6,42	2	6,26	1,5	6,47	1,5	6,13	1,5	5,98	1,5	5,85
2	6,86	2	6,86	2	6,3	2,5	6,15	2	6,36	2	5,95	2	5,59	2	5,51
2,5	6,83	3	6,78	2,5	6,18	3	6	2,5	6,2	2,5	5,75	2,5	5,41	2,5	5,4
3	6,8	3,5	6,73	3	6,07	3,5	5,92	3	6,05	3	5,51	3	5,24	3	5,13
3,5	6,78	4	6,68	3,5	5,95	4	5,76	3,5	5,86	3,5	5,36	3,5	5,04	3,5	4,86
4	6,74	4,5	6,63	4	5,8	4,5	5,62	4	5,76	4	5,19	4	4,84	4	4,64
5	6,7	5	6,56	4,5	5,68	5	5,49	4,5	5,59	4,5	5,04	4,5	4,64	4,5	4,45
5,5	6,68	5,5	6,51	5	5,58	5,5	5,37	5	5,44	5	4,81	5,5	4,27	5	4,13
6	6,65	6	6,45	5,5	5,48	6	5,24	5,5	5,31	5,5	4,62	6	3,93	5,5	3,91
6,5	6,63	6,5	6,38	6	5,37	6,5	5,25	6	5,13	6	4,44			6	3,71
7	6,6	7	6,31	8º Pulso				9º Pulso		10º Pulso		11º Pulso			
7,5	6,57	7,5	6,24	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)			Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)		
8	6,54	8	6,19	0	6,16			0	6,61	0	6,39	0	6,98		
				0,5	6,01			0,5	6,37	0,5	6,01	0,5	6,79		
				1	5,84			1	6,24	1	5,73	1	6,52		
				1,5	5,58			1,5	6,04	1,5	5,48	1,5	6,36		
				2,5	4,96			2	5,68	2	5,34	2	6,18		
				3	4,78			2,5	5,52	2,5	5,2	2,5	5,98		
				3,5	4,52			3	5,26	3	5	3	5,85		
				4	4,32			3,5	4,98	3,5	4,79	3,5	5,65		
				4,5	4,06			4	4,85	4	4,63	4	5,43		
				5	3,87			4,5	4,6	4,5	4,42	4,5	5,27		
				5,5	3,5			5	4,37	5	4,13	5	5,08		
				6	3,32			5,5	4,16			5,5	4,98		
								6	3,95			6	4,8		

## APÊNDICE 7

**Tabela 7A:** Variação da concentração de OD ao longo do tempo, obtido na determinação da atividade nitrificante no 217º dia de operação.

Concentração celular: SST = 2,52 g/L															
Endógena		1º Pulso		2º Pulso		3º Pulso		4º Pulso		5º Pulso		6º Pulso		7º Pulso	
Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)
0	6,78	0	6,77	0	6,34	0	6,13	0	6,25	0	6,08	0	6,09	0	5,19
0,5	6,72	0,5	6,73	0,5	6,22	0,5	6,03	0,5	6,07	0,5	5,85	0,5	5,78	0,25	
1	6,69	1	6,68	1	6,09	1	5,8	1	5,83	1	5,43	1	5,51	0,5	4,77
1,5	6,63	1,5	6,62	1,5	5,94	1,5	5,59	1,5	5,58	1,5	5,12	1,5	5,19	0,75	4,61
2	6,6	2	6,53	2	5,76	2	5,33	2	5,32	2	4,82	2	4,81	1	4,41
2,5	6,57	2,5	6,48	2,5	5,6	2,5	5,12	2,5	5,1	2,5	4,52	2,5	4,51	1,25	
3	6,54	3	6,39	3	5,44	3	5,03	3	4,83	3	4,22	3	4,12	1,5	4,01
3,5	6,5	3,5	6,3	3,5	5,27	3,5	4,88	3,5	4,57	3,5	3,91	3,5	3,81	1,75	3,84
4	6,44	4	6,23	4	5,13	4	4,69	4	4,32	4	3,65	4	3,46	2	3,62
4,5	6,42	4,5	6,15	4,5	4,95	4,5	4,44	4,5	4,08					2,25	3,45
5	6,38	5	6,06	5	4,78	5	4,22	5	3,84					2,5	3,26
5,5	6,35	5,5	5,98	5,5	4,63	5,5	4							2,75	3,07
6	6,26	6	5,86	6	4,48	6	3,77							3	2,88
6,5	6,25					8º Pulso		9º Pulso		10º Pulso		11º Pulso		12º Pulso	
7	6,2					Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)
7,5	6,16					0	5,45	0	5,58	0	6,02	0	5,31	0	5,69
8	6,12					0,5	5,15	0,25	5,47	0,5	5,53	0,25	5,06	0,25	5,65
8,5	6,06					0,75	4,89	0,5	5,23	0,75	5,34	0,5	4,88	0,5	5,49
9	6,02					1	4,68	0,75	4,99	1	5,08	1	4,51	0,75	5,23
9,5	6					1,5	4,18	1	4,76	1,25	4,9	1,25	4,24	1	5,1
10	5,94					1,75	3,94	1,25	4,5	1,5	4,71	1,5	4,07	1,25	4,9
						2	3,69	1,5	4,27	2	4,41	1,75	3,83	1,5	4,69
						2,25	3,23	1,75	4,01	2,25	4,03	2	3,65	1,75	4,29
						3	2,81	2	3,77	2,5	3,78	2,5	3,23	2,25	4,07
								2,25	3,52	2,75	3,63	2,75	3,03	2,5	3,88
								2,5	3,29	3	3,39	3	2,83	2,75	3,68
								2,75	3,06	3,5	3,18			3	3,49
								3	2,84						



## APÊNDICE 8

**Tabela 8A:** Variação da concentração de OD ao longo do tempo, obtido na determinação da atividade nitrificante no 218º dia de operação.

Concentração celular: SST = 1,14g/L; SSV = 0,78g/L																	
Endógena		1º Pulso		2º Pulso		3º Pulso		4º Pulso		5º Pulso		6º Pulso		7º Pulso		8º Pulso	
Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)
0	5,94	0	5,95	0	5,82	0	5,81	0	5,63	0	5,78	0	5,59	0	5,83	0	5,48
0,5	5,92	0,5	5,92	0,5	5,79	0,5	5,68	0,5	5,53	0,5	5,64	0,5	5,45	0,5	5,7	0,5	5,36
1	5,9	1	5,86	1	5,74	1	5,62	1	5,43	1	5,52	1	5,36	1	5,58	1	5,22
1,5	5,86	1,5	5,82	1,5	5,68	1,5	5,53	1,5	5,36	1,5	5,42	1,5	5,24	1,5	5,45	1,5	5,04
2	5,84	2	5,75	2	5,61	2	5,46	2	5,27	2	5,36	2	5,11	2	5,31	2	4,89
2,5	5,81	2,5	5,7	2,5	5,56	2,5	5,38	2,5	5,17	2,5	5,24	2,5	5,01	2,5	5,13	2,5	4,73
3	5,73	3	5,64	3	5,48	3	5,31	3	5,08	3	5,12	3	4,91	3	5,03	3	4,48
3,5	5,7	3,5	5,59	3,5	5,42	3,5	5,23	3,5	4,98	4	4,89	3,5	4,8	3,5	4,89	3,5	4,37
4,5	5,66	4	5,53	4	5,37	4	5,15	4	4,89	4,5	4,77	4	4,66	4	4,73	4	4,25
5	5,64	4,5	5,46	4,5	5,28	4,5	5,07	4,5	4,78	5	4,68	4,5	4,53	4,5	4,47	4,5	4,09
5,5	5,62	5	5,39	5	5,22	5	5	5	4,69	5,5	4,55	5	4,4	5	4,38	5,5	3,76
6	5,59	5,5	5,34	5,5	5,16	5,5	4,92	5,5	4,6	6	4,41	5,5	4,3	6	4,06	6	3,66
6,5	5,57	6	5,29	6	5,11	6	4,82	6	4,5			6	4,18				
				9º Pulso		10º Pulso		11º Pulso		12º Pulso		13º Pulso					
				Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)				
				0	5,65	0	6,06	0	5,81	0	5,78	0	5,94				
				0,5	5,52	0,5	5,89	0,5	5,68	0,5	5,69	0,5	5,85				
				1	5,37	1	5,73	1	5,55	1	5,53	1	5,72				
				1,5	5,23	1,5	5,6	1,5	5,43	1,5	5,45	1,5	5,63				
				2	5,06	2	5,48	2	5,29	2	5,34	2	5,53				
				2,5	4,86	2,5	5,32	2,5	5,18	2,5	5,23	2,5	5,42				
				3	4,69	3	5,15	3	5,03	3,5	4,99	3	5,29				
				3,5	4,51	3,5	5	3,5	4,87	4	4,84	3,5	5,16				
				4	4,37	4	4,89	4	4,73	4,5	4,71	4	5,05				
				4,5	4,14	4,5	4,67	4,5	4,57	5	4,56	4,5	4,9				
				5	3,96	5,5	4,34	5	4,47	5,5	4,44	5	4,79				
								5,5	4,33	6	4,3	5,5	4,66				
								6	4,19			6	4,56				

## APÊNDICE 9

**Tabela 9A:** Variação da concentração de OD ao longo do tempo, obtido na determinação da atividade nitrificante no 220º dia de operação.

Concentração celular: SST = 3,51 g/L																	
Endógena		1º Pulso		2º Pulso		3º Pulso		4º Pulso		5º Pulso		6º Pulso		7º Pulso		8º Pulso	
Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)
0	6,01	0	6	0	5,82	0	5,3	0	5,53	0,00	5,09	0,00	5,01	0,00	5,17	0,00	5,10
0,5	5,98	0,5	5,95	0,5	5,62	0,5	5,12	0,5	5,03	0,17	4,99	0,33	4,73	0,33	4,91	0,17	4,98
1	5,94	1	5,88	1	5,4	1	4,95	1	4,49	0,33	4,74	0,50	4,53	0,50	4,64	0,33	4,78
1,5	5,92	1,5	5,83	1,5	5,24	1,5	4,64	1,25	4,19	0,50	4,56	0,67	4,37	0,67	4,45	0,50	4,57
2	5,9	2	5,76	2	5,06	2	4,41	1,5	3,93	0,67	4,38	0,83	4,16	0,83	4,26	0,67	4,35
2,5	5,88	2,5	5,7	2,5	4,88	2,5	4,16	1,75	3,67	0,83	4,16	1,00	3,97	1,00	4,06	0,83	4,15
3	5,85	3	5,59	3	4,69	3	3,95	2	3,4	1,00	3,93	1,17	3,78	1,17	3,81	1,00	3,94
3,5	5,84	3,5	5,46	3,5	4,53	3,5	3,67	2,25	3,12	1,17	3,67	1,33	3,55	1,33	3,59	1,33	3,49
4	5,82	4	5,37	4	4,3	4	3,44	2,5	2,88	1,33	3,51	1,50	3,39	1,50	3,39	1,83	2,86
4,5	5,8	4,5	5,27	4,5	4,13	4,5	3,19			1,67	3,09	1,67	3,19	1,67	3,20	2,00	2,64
5	5,78	5	5,14	5	3,9					1,83	2,91	1,83	2,94	2,00	3,02		
5,5	5,76	5,5	5	0	5,82												
6	5,74	6	4,93														
6,5	5,72																
		9º Pulso		10º Pulso		11º Pulso		12º Pulso		13º Pulso		14º Pulso		15º Pulso		16º Pulso	
		Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)
		0,00	5,14	0,00	4,19	0,00	5,10	0,00	4,96	0,00	5,23	0,00	5,39	0,00	4,90	0,00	5,00
		0,17	5,04	0,17	4,09	0,17	4,95	0,17	4,72	0,33	4,95	0,17	5,12	0,17	4,73	0,17	4,84
		0,50	4,59	0,33	3,86	0,33	4,71	0,33	4,50	0,50	4,62	0,33	4,97	0,33	4,55	0,33	4,62
		0,83	4,15	0,50	3,65	0,50	4,48	0,50	4,26	0,67	4,43	0,50	4,65	0,50	4,31	0,50	4,42
		1,00	3,94	0,67	3,41	0,67	4,28	0,67	4,02	1,00	4,02	0,67	4,38	0,67	4,08	0,67	4,20
		1,17	3,72	1,00	2,94	0,83	4,03	0,83	3,79	1,17	3,79	0,83	4,22	0,83	3,84	0,83	3,98
		1,33	3,47	1,17	2,71	1,00	3,81	1,00	3,55	1,33	3,51	1,17	3,85	1,00	3,68	1,00	3,78
		1,50	3,24	1,33	2,50	1,33	3,37	1,17	3,39	1,50	3,29	1,33	3,64	1,17	3,48	1,17	3,59
		1,67	3,06			1,50	3,12	1,33	3,16	1,67	3,15	1,50	3,41	1,33	3,18	1,33	3,40
		1,83	2,84			1,67	2,85	1,50	2,99	1,83	2,92	1,67	3,15				
		2,00	2,61			1,83	2,87	1,67	2,72	2,00	2,72	1,83	2,96				
						2,00	2,47	2,00	2,36			2,00	2,69				

## APÊNDICE 10

**Tabela 10A:** Variação da concentração de OD ao longo do tempo, obtido na determinação da atividade nitrificante no 221º dia de operação

Concentração celular: SST=3,02 g/L															
Endógena		1º Pulso		2º Pulso		3º Pulso		4º Pulso		5º Pulso		6º Pulso		7º Pulso	
Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)
0	6,31	0	6,43	0	6,53	0	6,29	0	6,36	0	6,53	0	6,32	0	6
0,5	6,3	0,5	6,38	0,75	6,46	0,5	6,15	0,5	6,22	0,5	6,3	0,25	6,19	0,5	5,62
1	6,29	1	6,32	1	6,41	1	5,96	1	6	0,75	6,14	0,5	5,98	0,75	5,4
1,5	6,28	1,5	6,28	1,5	6,28	1,5	5,79	1,5	5,77	1	5,99	1	5,59	1	5,15
2	6,27	2	6,2	2	6,18	2	5,55	1,75	5,68	1,25	5,83	1,25	5,38	1,25	4,95
2,5	6,26	2,5	6,12	2,5	6,07	2,5	5,41	2	5,57	1,75	5,54	1,5	5,19	1,5	4,74
3	6,25	3	6,05	3	5,95	3	5,25	2,25	5,43	2	5,35	2	4,58	1,75	4,46
3,5	6,24	3,5	5,98	3,5	5,82	3,5	5,01	2,5	5,32	2,25	5,17	2,5	4,25	2	4,23
4	6,22	4	5,89	4	5,63	4	4,82	2,75	5,16	2,5	4,99	2,75	4,15	2,5	3,78
4,5	6,21	4,5	5,83	4,5	5,53	5	4,48	3	5,08	2,75	4,81	3	3,97		
5	6,19	5	5,71	5	5,38			3,5	4,79	3	4,64				
5,5	6,18	6	5,58	5,5	5,22			4	4,54						
6	6,17	6,5	5,45	6	5,15			4,5	4,27						
6,5	6,15														
7,5	6,14														
				8º Pulso		9º Pulso		10º Pulso		11º Pulso		12º Pulso			
				Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)
				0	5,86	0	6,02	0	6,21	2,5	3,78	0	6,48	0	6,13
				0,5	5,35	0,5	5,65	0,5	5,96	2,75	3,52	0,5	5,91	0,25	5,95
				1	4,76	0,75	5,38	0,75	5,65	3	3,25	0,75	5,72	0,5	5,7
				1,25	4,47	1	4,95	1	5,38			1	5,47	0,75	5,44
				1,5	4	1,25	4,74	1,25	5,12			1,5	4,99	1	5,2
				1,75	3,73	1,5	4,52	1,5	4,87			1,75	4,75	1,25	4,93
				2	3,57	1,75	4,34	1,75	4,58			2	4,49	1,5	4,58
				2,5	3,34	2	4,06	2	4,33			2,25	4,25	2	4,34
						2,25	3,56	2,25	4,05			2,5	4	2,25	4,02
						2,5	3,4								

# APÊNDICE 11

**Tabela 11A:** Variação da concentração de OD ao longo do tempo, obtido na determinação da atividade nitrificante do 222º dia de operação.

Concentração celular: SST=4,26 g/L															
Endógena		1º Pulso		2º Pulso		3º Pulso		4º Pulso		5º Pulso		6º Pulso		7º Pulso	
Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)
0	6,3	0	6,24	0	5,93	0	5,58	0	5,46	0	5,37	0,00	4,86	0,00	4,85
0,5	6,24	0,25	6,12	0,25	5,83	0,25	5,43	0,25	5,29	0,25	5,13	0,17	4,64	0,17	4,65
1	6,2	0,5	6,08	0,5	5,74	0,5	5,29	0,5	5,07	0,5	4,77	0,33	4,39	0,33	4,38
1,5	6,18	0,75	6,05	0,75	5,65	0,75	5,1	0,75	4,91	0,75	4,36	0,50	4,10	0,50	4,08
2	6,16	1	6	1	5,53	1	4,83	1	4,67	1	3,93	0,67	3,80	0,67	3,72
2,5	6,14	1,5	5,96	1,5	5,35	1,25	4,68	1,25	4,44	1,25	3,53	0,83	3,56	0,83	3,44
3	6,12	2	5,88	2	5,1	1,5	4,32	1,5	4,17	1,5	3,12	1,00	3,25	1,00	3,17
3,5	6,1	2,5	5,83	2,25	5,03	1,75	4,22	1,75	3,94			1,17	2,95	1,17	2,82
4	6,06	3	5,72	2,5	4,94	2,25	3,98	2	3,75			1,33	2,62	1,33	2,51
4,5	6,04	3,5	5,54	2,75	4,83	2,5	3,82								
5	6	4	5,48	3	4,73	2,75	3,6								
5,5	5,98	4,5	5,32			3	3,4								
6	5,95	5	5,27												
		5,5	5,12												
		6	5												
8º Pulso				9º Pulso		10º Pulso		10º Pulso		11º Pulso		12º Pulso		13º Pulso	
Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)
0,00	4,95	0,92	3,36	0,00	4,39	0,00	5,26	0,00	4,83	0,00	4,98	0,00	4,89	0,00	4,68
0,17	4,83	1,00	3,2	0,17	4,22	0,17	5,05	0,17	4,69	0,17	4,85	0,17	4,77	0,33	4,4
0,25	4,69	1,08	3,05	0,33	3,92	0,33	4,74	0,33	4,39	0,33	4,54	0,33	4,48	0,50	4,18
0,33	4,54	1,17	2,89	0,50	3,51	0,50	4,45	0,50	4,08	0,50	4,29	0,50	4,19	0,67	3,96
0,42	4,36			0,67	3,21	0,67	4,04	0,58	3,87	0,67	4	0,67	3,9	0,83	3,46
0,50	4,21			0,83	2,88	0,83	3,71	0,66	3,75	0,83	3,69	0,83	3,58	1,00	3,21
0,58	4,03			1,00	2,53	1,00	3,35	0,75	3,54	1,00	3,37	1,00	3,27	1,17	2,94
0,66	3,86					1,17	3	0,83	3,41	1,17	3,05	1,17	2,96	1,33	2,73
0,75	3,7							0,92	3,25						
0,83	3,55							1,00	3,09						
								1,08	2,92						







# APÊNDICE 14

**Tabela 14A:** Variação da concentração de OD ao longo do tempo, obtido na determinação da atividade nitrificante no 273º dia de operação.

Concentração celular: SST= 3,52 g/L																	
Endógena		1º Pulso		2º Pulso		3º Pulso		4º Pulso		5º Pulso		6º Pulso		7º Pulso		8º Pulso	
Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)
0,25	5,61	0	6,11	0	5,69	0,00	5,28	0,00	5,05	0,00	4,76	0,00	5,29	0,00	4,99	0,00	4,97
0,5	5,52	0,25	5,62	0,25	5,43	0,17	5,08	0,17	4,70	0,08	4,68	0,08	5,17	0,08	4,79	0,17	4,66
0,75	5,45	0,5	5,57	0,5	5,26	0,33	4,85	0,33	4,42	0,17	4,50	0,17	5,03	0,17	4,62	0,25	4,54
1	5,43	0,75	5,45	0,75	5	0,50	4,79	0,50	4,18	0,25	4,36	0,25	4,87	0,25	4,5	0,33	4,28
1,25	5,46	1	5,35	1	4,84	0,67	4,48	0,67	3,93	0,33	4,22	0,33	4,75	0,33	4,32	0,42	4,19
1,75	5,29	1,25	5,2	1,25	4,61	0,83	4,23	0,83	3,73	0,42	4,07	0,42	4,59	0,42	4,19	0,50	4,01
2	5,4	1,5	4,98	1,5	4,38	1,00	4,01	1,00	3,46	0,50	3,95	0,50	4,45	0,50	4,07	0,58	3,9
2,5	5,37	1,75	4,8	1,75	4,18	1,17	3,82	1,17	3,18	0,66	3,70	0,58	4,29	0,58	3,88	0,66	3,7
2,75	5,27	2	4,7	2	3,91	1,33	3,58	1,33	2,96	0,75	3,51	0,66	4,13	0,66	3,65	0,75	3,57
3	5,23	2,25	4,61	2,25	3,66	1,50	3,41	1,50	2,70	0,83	3,39	0,75	4,01	0,75	3,53	0,83	3,34
3,5	5,21	2,5	4,53	2,5	3,48	1,67	3,15	1,67	2,48	0,92	3,26	0,83	3,79	0,83	3,38	0,92	3,22
4	5,1	2,75	4,46	3	3,01	1,83	2,94	1,83	2,20	1,00	3,13	0,92	3,63	0,92	3,22	1,00	3,06
4,5	5,02	3	4,27			2,00	2,72			1,08	2,98	1,00	3,51	1,00	3,08	1,08	2,89
5	4,96					2,17	2,45			1,17	2,80	1,08	3,37	1,08	2,91	1,17	2,74
6	4,89					2,33	2,20			1,33	2,51	1,17	3,21	1,17	2,71	1,33	2,34
						2,50	1,99			1,50	2,23	1,25	3,09	1,25	2,59	1,50	2,09
												1,33	2,94	1,33	2,42		
												1,42	2,74				
												1,50	2,64				
												1,58	2,46				



# APÊNDICE 14 (Continuação)

Tabela 14A (Continuação)

9º Pulso		10º Pulso		11º Pulso		12º Pulso		13º Pulso		14º Pulso		15º Pulso		16º Pulso	
Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)
0,00	5,21	0,17	4,99	0,00	4,96	0,08	4,95	0,00	5,13	0,00	5,54	0,00	5,36	0,00	5,41
0,08	5,08	0,25	4,82	0,08	4,73	0,25	4,65	0,08	5,05	0,08	5,29	0,08	5,2	0,08	5,24
0,17	4,97	0,33	4,6	0,17	4,58	0,33	4,4	0,17	4,94	0,17	5,12	0,17	4,98	0,17	5,08
0,25	4,84	0,42	4,47	0,25	4,43	0,42	4,28	0,25	4,81	0,25	4,98	0,25	4,77	0,25	4,93
0,33	4,68	0,50	4,3	0,33	4,28	0,50	4,01	0,33	4,64	0,33	4,83	0,33	4,68	0,33	4,75
0,42	4,55	0,58	4,19	0,42	4,1	0,58	3,91	0,42	4,5	0,42	4,59	0,42	4,5	0,42	4,62
0,50	4,32	0,66	4,02	0,50	3,93	0,66	3,79	0,50	4,28	0,50	4,48	0,50	4,38	0,50	4,55
0,58	4,15	0,75	3,85	0,58	3,75	0,75	3,61	0,58	4,1	0,58	4,4	0,58	4,22	0,58	4,42
0,66	4,05	0,83	3,68	0,66	3,6	0,83	3,38	0,66	3,94	0,66	4,21	0,66	4,12	0,66	4,24
0,83	3,76	0,92	3,49	0,75	3,4	0,92	3,28	0,75	3,82	0,75	4,04	0,75	4,01	0,75	4,12
0,92	3,56	1,00	3,36	0,83	3,24	1,00	3,08	0,83	3,62	0,83	3,89	0,83	3,85	0,83	4
1,00	3,44	1,08	3,2	0,92	3,05	1,08	2,98	0,92	3,58	0,92	3,76	0,92	3,7	0,92	3,86
1,08	3,12	1,17	3,04	1,00	2,89	1,17	2,81	1,00	3,34	1,00	3,6	1,00	3,58	1,00	3,7
1,17	2,97	1,25	2,82	1,08	2,74	1,25	2,57	1,08	3,17	1,08	3,44	1,08	3,4	1,08	3,55
1,25	2,8	1,33	2,53	1,17	2,58			1,17	2,93	1,17	3,26	1,17	3,23	1,17	3,4
1,33	2,49	1,50	2,23	1,25	2,27			1,25	2,8	1,25	3,06	1,33	2,96	1,25	3,27
								1,33	2,62	1,50	2,62				

# APÊNDICE 15

**Tabela 15A:** Variação do OD com o tempo, obtido na determinação da atividade nitrificante no 273º dia de operação para SST=5,83 g/L.

Concentração celular: SST = 5,83 g/L																	
Endógena		1º Pulso		2º Pulso		3º Pulso		4º Pulso		5º Pulso		6º Pulso		7º Pulso		8º Pulso	
Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)
0,5	5,74	0	5,2	0,00	4,65	0,00	4,44	0,00	4,75	0,00	4,48	0,00	4,68	0,00	4,15	0,00	5,16
0,75	5,71	0,25	4,86	0,17	4,28	0,08	4,19	0,08	4,53	0,08	4,32	0,08	4,52	0,08	3,85	0,08	4,81
1	5,68	0,5	4,71	0,25	3,99	0,17	3,98	0,17	4,27	0,17	4,09	0,17	4,10	0,17	3,50	0,17	4,48
1,25	5,66	0,75	4,48	0,33	3,79	0,25	3,87	0,25	4,16	0,25	3,88	0,25	3,88	0,25	3,33	0,25	4,30
1,75	5,62	1	4,2	0,42	3,66	0,33	3,62	0,33	3,77	0,33	3,64	0,33	3,79	0,33	3,14	0,33	4,01
2,5	5,55	1,25	3,91	0,50	3,32	0,42	3,51	0,42	3,65	0,42	3,34	0,42	3,38	0,42	2,80	0,42	3,74
3	5,52	1,5	3,74	0,58	3,21	0,50	3,30	0,50	3,45	0,50	3,16	0,50	3,13	0,50	2,58	0,50	3,53
3,25	5,5	1,75	3,53	0,66	3,11	0,58	3,07	0,58	3,32	0,58	2,94	0,58	2,81	0,58	2,35	0,58	3,16
3,5	5,48	2	3,33	0,75	2,92	0,66	2,89	0,66	3,04	0,66	2,75	0,66	2,68	0,66	2,15	0,66	2,90
4	5,45	2,25	3	0,83	2,86	0,75	2,66	0,75	2,88	0,75	2,49	0,75	2,37	0,75	1,89	0,75	2,64
4,25	5,42	2,5	2,84	0,92	2,62	0,83	2,54	0,83	2,59	0,83	2,34	0,83	2,16	0,83	1,64	0,83	2,38
4,5	5,4	2,75	2,6	1,00	2,56	0,92	2,38	0,92	2,37	0,92	2,07	0,92	1,87			0,92	2,08
4,75	5,36	3	2,35			1,00	2,17										
5	5,32	9º Pulso		10º Pulso		11º Pulso		12º Pulso		13º Pulso		14º Pulso		15º Pulso			
5,25	5,3	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)		
		0,00	5,26	0,00	4,78	0,00	5,24	0,00	5,02	0,00	4,81	0,00	5,46	0,00	5,28		
		0,08	5,15	0,17	4,18	0,08	4,95	0,08	4,7	0,08	4,54	0,08	5,12	0,08	4,98		
		0,17	4,90	0,25	4,07	0,17	4,76	0,17	4,42	0,17	4,28	0,17	4,86	0,17	4,66		
		0,25	4,52	0,33	3,65	0,25	4,47	0,25	4,18	0,25	3,92	0,25	4,54	0,25	4,38		
		0,33	4,39	0,42	3,37	0,33	4,22	0,33	3,81	0,33	3,62	0,33	4,23	0,33	4,11		
		0,42	4,05	0,50	3,09	0,42	3,94	0,42	3,61	0,42	3,3	0,42	3,99	0,42	3,88		
		0,50	3,86	0,58	2,81	0,50	3,67	0,50	3,32	0,50	3,11	0,50	3,7	0,50	3,69		
		0,58	3,35	0,66	2,54	0,58	3,35	0,58	3,08	0,58	2,89	0,58	3,5	0,58	3,44		
		0,66	3,24	0,75	2,27	0,67	3,05	0,67	2,75	0,67	2,61	0,67	3,24	0,67	3,14		
		0,75	3,01	0,83	1,98	0,75	2,82	0,75	2,52	0,75	2,38	0,75	2,98	0,75	2,88		
		0,83	2,74			0,83	2,51	0,83	2,26	0,83	2,1	0,83	2,73	0,83	2,63		
		0,92	2,32			0,92	2,25	0,92	2,02	0,92	1,86	0,92	2,46	0,92	2,42		
		1,00	2,05			1,00	2,01					1,00	2,24	1,00	2,12		

# APÊNDICE 16

**Tabela 16A:** Variação da concentração de OD ao longo do tempo, obtido na determinação da atividade nitrificante no 293º dia de operação.

Concentração celular: SST=1,19 g/L; SSV =0,80 g/L															
Endógena		1º Pulso		2º Pulso		3º Pulso		4º Pulso		5º Pulso		6º Pulso		7º Pulso	
Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)
0,25	6,86	0,5	6,58	0,17	6,34	0,00	6,61	0,00	5,96	0,00	6,30	0,00	6,33	0,00	6,35
0,5	6,82	0,75	6,44	0,33	6,26	0,17	6,33	0,17	5,83	0,17	6,00	0,17	6,21	0,17	6,08
0,75	6,78	1	6,32	0,50	6,10	0,33	6,17	0,50	5,47	0,33	5,85	0,33	6,08	0,33	5,83
1	6,75	1,25	6,26	0,67	5,93	0,50	6,09	0,67	5,43	0,50	5,78	0,50	5,69	0,50	5,72
1,25	6,72	1,5	6,15	0,83	5,81	0,67	5,97	0,83	5,28	0,67	5,60	0,67	5,64	0,67	5,49
1,5	6,68	1,75	6,01	1,00	5,75	0,83	5,78	1,00	5,06	0,83	5,44	0,83	5,50	0,83	5,34
2	6,64	2	5,91	1,17	5,61	1,00	5,71	1,17	4,88	1,00	5,27	1,00	5,36	1,00	5,15
2,25	6,6	2,25	5,83	1,33	5,50	1,17	5,45	1,33	4,73	1,17	5,10	1,17	5,19	1,17	5,01
2,5	6,58	2,5	5,69	1,50	5,35	1,33	5,36	1,50	4,50	1,33	4,96	1,33	5,00	1,33	4,77
2,75	6,55	3	5,6	1,67	5,24	1,50	5,24	1,67	4,36	1,50	4,84	1,50	4,82	1,50	4,60
3	6,52	3,25	5,51	2,00	5,10	1,67	5,12	1,83	4,21	1,67	4,62	1,67	4,71	1,67	4,47
3,25	6,5	3,5	5,31	2,17	4,89	1,83	4,96	2,00	4,04	2,00	4,34	2,00	4,43	1,83	4,36
3,5	6,48	3,75	5,26	2,33	4,80	2,00	4,82	2,17	3,87	2,33	4,07	2,17	4,23	2,00	4,24
3,75	6,45	4	5,16	2,50	4,73	2,17	4,71	2,33	3,73	2,50	3,81	2,33	4,02	2,17	4,05
4	6,42	4,25	5,08	2,67	4,62	2,33	4,64	2,50	3,58			2,50	3,85	2,33	3,88
		4,5	4,99	2,83	4,50	2,50	4,50	2,67	3,45			2,67	3,70	2,50	3,67
		4,75	4,9	3,00	4,36	2,67	4,34	2,83	3,32					2,67	3,48
		5	4,79			2,83	4,16	3,00	3,18						
						3,00	4,08								

## APÊNDICE 16 (Continuação)

Tabela 16A (Continuação)

8º Pulso		9º Pulso		10º Pulso		11º Pulso		12º Pulso		13º Pulso		14º Pulso		15º Pulso	
Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)
0,17	6,09	0,00	6,30	0,00	6,40	0,33	5,90	0,00	6,13	0,17	6,07	0,00	6,40	0,00	6,16
0,33	5,83	0,17	6,09	0,17	6,27	0,50	5,65	0,17	5,82	0,33	5,84	0,17	6,14	0,17	5,96
0,50	5,69	0,33	5,91	0,33	5,99	0,67	5,50	0,33	5,74	0,67	5,49	0,33	6,02	0,33	5,84
0,67	5,50	0,50	5,70	0,83	5,38	0,83	5,32	0,50	5,44	0,83	5,30	0,50	5,75	0,50	5,68
0,83	5,44	0,67	5,53	1,00	5,29	1,00	5,14	0,67	5,34	1,00	5,12	0,67	5,62	0,67	5,51
1,00	5,14	0,83	5,33	1,17	5,09	1,17	4,92	0,83	5,13	1,17	4,99	0,83	5,38	0,83	5,32
1,17	5,00	1,00	5,14	1,33	4,89	1,33	4,80	1,00	4,89	1,50	4,58	1,00	5,22	1,00	5,20
1,33	4,84	1,17	4,93	1,50	4,73	1,50	4,58	1,17	4,75	1,83	4,29	1,17	5,03	1,17	5,06
1,50	4,65	1,33	4,82	1,67	4,49	1,67	4,40	1,33	4,58	2,00	4,07	1,33	4,93	1,33	4,92
1,67	4,47	1,50	4,61	1,83	4,27	1,83	4,22	1,50	4,35	2,17	3,93	1,50	4,74	1,50	4,76
1,83	4,38	1,67	4,42	2,00	4,17	2,00	4,12	1,67	4,19	2,33	3,78	1,67	4,52	1,67	4,46
2,00	4,17	1,83	4,24	2,17	3,94	2,17	3,96	1,83	3,99			1,83	4,43	2,00	4,17
2,17	3,96	2,00	4,11	2,33	3,80	2,33	3,69	2,00	3,84			2,00	4,25	2,17	4,07
2,33	3,88	2,17	3,94	2,50	3,65	2,50	3,54					2,17	4,03	2,33	3,89
2,50	3,60	2,33	3,74	2,67	3,44	2,67	3,42					2,33	3,90	2,67	3,67
		2,50	3,53	2,83	3,23	2,83	3,21					2,50	3,79	2,83	3,44
												2,67	3,59	3,00	3,24

## APÊNDICE 17

**Tabela 17A:** Dados obtidos para a determinação da atividade nitrificante referente ao 7º dia de operação.

Pulso	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
N-NH <sub>4</sub> (mg/L)	0	0,40	0,54	0,92	1,42	2,25	4,33	4,78	13,50	14,78	22,30	29,93	33,35	51,58	63,65	71,28	90,93
QO <sub>2</sub> X	0	0,10	0,05	0,11	0,08	0,12	0,12	0,12	0,13	0,12	0,11	0,11	0,11	0,11	0,10	0,10	0,09
QO <sub>2</sub> (SSV)	0	0,13	0,07	0,15	0,10	0,16	0,14	0,15	0,15	0,15	0,14	0,14	0,13	0,12	0,13	0,12	0,12
QO <sub>2</sub> (SST)	0	0,06	0,03	0,06	0,04	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,06	0,06	0,06	0,06	0,05	0,05	0,05

**Tabela 17B:** Dados obtidos para a determinação da atividade nitrificante referente ao 92º dia de operação.

Pulso	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
N-NH <sub>4</sub> (mg/L)	0	1,04	3,60	5,02	12,20	17,38	38,75	68,10	70,83	85,24	101,32
QO <sub>2</sub> X	0	0,06	0,10	0,26	0,35	0,36	0,50	0,51	0,47	0,46	0,43
QO <sub>2</sub> (SSV)	0	0,08	0,13	0,34	0,47	0,48	0,66	0,67	0,61	0,61	0,56
QO <sub>2</sub> (SST)	0	0,05	0,08	0,21	0,29	0,30	0,41	0,42	0,38	0,38	0,35

**Tabela 17C:** Dados obtidos para a determinação da atividade nitrificante referente ao 189º dia de operação.

Pulso	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
N-NH <sub>4</sub> (mg/L)	0	3,62	7,60	17,60	28,89	33,13	41,03	67,25	96,56	260,06	386,02
QO <sub>2</sub> X	0	0,03	0,04	0,08	0,09	0,12	0,15	0,20	0,19	0,15	0,10
QO <sub>2</sub> (SSV)	0	0,03	0,05	0,11	0,12	0,16	0,20	0,27	0,25	0,20	0,13
QO <sub>2</sub> (SST)	0	0,02	0,03	0,07	0,08	0,11	0,13	0,18	0,17	0,14	0,09
Nitrito (mg/L)	0				2,54	3,11	5,78		14,93	22,25	

**Tabela 17D:** Dados obtidos para a determinação da atividade nitrificante referente ao 214º dia de operação.

Pulso	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
N-NH <sub>4</sub> (mg/L)	0	5,00	7,00	20,12	24,98	33,24	37,06	48,55	94,03	132,88	159,82	228,76	265,73	310,50	390,76
QO <sub>2</sub> X	0	0,03	0,06	0,08	0,09	0,10	0,12	0,13	0,12	0,12	0,10	0,08	0,06	0,05	0,03
QO <sub>2</sub> (SST)	0	0,06	0,11	0,15	0,17	0,19	0,23	0,24	0,23	0,22	0,19	0,15	0,11	0,10	0,06
S/SST	0	9,43	13,21	37,96	47,13	62,72	69,92	91,60	177,42	250,72	301,55	431,62	501,38	585,85	737,28
Nitrito (mg/L)	0					1,93		10,77		12,81		13,60		13,94	

### APÊNDICE 17 (Continuação)

**Tabela 17E:** Dados obtidos para a determinação da atividade nitrificante referente ao 216º dia de operação.

Pulso	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
N-NH <sub>4</sub> (mg/L)	0	5,92	8,52	14,01	16,86	23,56	69,39	121,52	209,00	325,69	625,35	828,18
QO <sub>2</sub> X	0	0,06	0,18	0,22	0,25	0,31	0,39	0,42	0,43	0,39	0,36	0,31
QO <sub>2</sub> (SST)	0	0,04	0,12	0,14	0,16	0,20	0,25	0,27	0,28	0,25	0,23	0,20
S/SST	0	3,80	5,47	9,00	10,83	15,13	44,56	78,05	134,23	209,18	401,64	531,91
Nitrito (mg/L)	0			1,40		2,91	11,11	12,53		16,95	20,13	

**Tabela 17F:** Dados obtidos para a determinação da atividade nitrificante referente ao 217º dia de operação.

Pulso	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
N-NH <sub>4</sub> (mg/L)	4,87	8,66	17,68	19,41	27,70	35,64	41,66	114,14	148,00	227,96	258,17	330,43	4,87
QO <sub>2</sub> X	0,07	0,24	0,29	0,41	0,54	0,58	0,69	0,86	0,87	0,75	0,74	0,69	0,07
QO <sub>2</sub> (SST)	0,03	0,09	0,12	0,16	0,21	0,23	0,27	0,34	0,34	0,30	0,29	0,27	0,03
S/SST	1,93	3,44	7,02	7,70	10,99	14,14	16,53	45,29	58,73	90,46	102,45	131,12	1,93
Nitrito (mg/L)			1,14			1,93	12,81	13,94		15,54			

**Tabela 17G:** Dados obtidos para a determinação da atividade nitrificante referente ao 218º dia de operação.

Pulso	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
N-NH <sub>4</sub> (mg/L)	0	5,73	9,38	14,45	25,45	26,75	32,47	45,59	56,35	86,68	197,75	276,25	364,69	540,2
QO <sub>2</sub> X	0	0,05	0,06	0,10	0,13	0,16	0,17	0,24	0,25	0,28	0,24	0,21	0,19	0,17
QO <sub>2</sub> (SSV)	0	0,05	0,06	0,09	0,11	0,14	0,15	0,21	0,22	0,25	0,21	0,19	0,16	0,15
QO <sub>2</sub> (SST)	0	0,07	0,08	0,12	0,16	0,21	0,22	0,30	0,32	0,36	0,31	0,27	0,24	0,22
S/SST	0	5,04	8,25	12,71	22,38	23,53	28,56	40,10	49,56	76,24	173,92	242,96	320,75	475,11
Nitrito (mg/L)	0			1,74			4,04		17,30		20,31	21,19		22,25

### APÊNDICE 17 (Continuação)

**Tabela 17H:** Dados obtidos na determinação da atividade nitrificante referente ao 220º dia de operação.

Pulso	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
N-NH <sub>4</sub> (mg/L)	0	5,92	8,90	10,98	45,35	68,67	53,22	58,54	69,20	82,83	111,26	137,33	170,50	311,38	364,69	847,86	1234,32
QO <sub>2</sub> X	0	0,14	0,33	0,44	1,03	1,19	1,10	1,12	1,22	1,25	1,28	1,27	1,29	1,25	1,27	1,24	1,18
QO <sub>2</sub> (SST)	0	0,04	0,09	0,12	0,29	0,34	0,31	0,32	0,35	0,36	0,36	0,36	0,37	0,36	0,36	0,35	0,34
S/SST	0	1,69	2,54	3,13	12,93	19,58	15,18	16,69	19,73	23,62	31,73	39,16	48,62	88,79	103,99	241,76	351,96
Nitrito (mg/L)	0			1,23		6,44		14,84		17,32		20,94			33,93		38,52

**Tabela 17I:** Dados obtidos na determinação da atividade nitrificante referente ao 221º dia de operação.

Pulso	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
N-NH <sub>4</sub> (mg/L)	0	3,74	7,53	11,98	27,28	31,50	51,62	68,20	100,20	207,22	258,08	407,34	652,32
QO <sub>2</sub> X	0	0,13	0,22	0,34	0,45	0,62	0,80	0,95	1,06	1,05	1,01	0,95	0,93
QO <sub>2</sub> (SST)	0	0,04	0,07	0,11	0,15	0,20	0,26	0,31	0,35	0,35	0,33	0,31	0,31
S/SST	0	1,25	2,51	3,99	9,09	10,50	17,21	22,73	33,33	69,07	86,03	135,78	217,44
Nitrito (mg/L)	0			1,49			7,58		18,72		20,82		34,61

**Tabela 17J:** Dados obtidos na determinação da atividade nitrificante referente ao 222º dia de operação.

Pulso	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
N-NH <sub>4</sub> (mg/L)	0	6,72	7,36	8,90	14,68	46,54	63,36	129,04	330,90	198,93	563,53	1033,16	1497,86	1866,52
QO <sub>2</sub> X	0	0,14	0,35	0,68	0,82	1,49	1,63	1,74	1,87	1,83	1,79	1,64	1,66	1,53
QO <sub>2</sub> (SST)	0	0,03	0,08	0,16	0,19	0,35	0,38	0,41	0,44	0,43	0,42	0,39	0,39	0,36
S/SST	0	1,58	1,73	2,09	3,45	10,92	14,87	30,29	77,68	46,70	132,28	242,53	351,61	438,15
Nitrito (mg/L)	0			2,80		7,40					29,30	42,38		45,03

### APÊNDICE 17 (Continuação)

**Tabela 17K:** Dados obtidos na determinação da atividade nitrificante referente ao 255º dia de operação

Pulso	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
N-NH <sub>4</sub> (mg/L)	0	15,01	34,82	39,79	57,67	106,11	157,72	243,36	295,48	434,80
QO <sub>2</sub> X	0	0,22	0,28	0,31	0,38	0,39	0,37	0,36	0,33	0,31
QO <sub>2</sub> (SST)	0	0,33	0,41	0,45	0,55	0,56	0,54	0,52	0,47	0,45
S/SST	0	21,85	50,68	57,91	83,94	154,45	229,58	354,24	430,10	632,90
Nitrito (mg/L)	0	0,58	0,72	0,79	0,97	1,00	0,95	0,92	0,84	0,80

**Tabela 17L:** Dados obtidos na determinação da atividade nitrificante referente ao 286º dia de operação

Pulso	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
N-NH <sub>4</sub> (mg/L)	0	11,66	23,81	47,70	131,02	148,23	198,11	278,22	326,03	395,82	586,46	790,56	1360,62
QO <sub>2</sub> X	0	0,24	0,61	0,97	1,36	1,42	1,43	1,40	1,37	1,36	1,28	1,20	1,11
QO <sub>2</sub> (SST)	0	0,12	0,26	0,40	0,54	0,57	0,57	0,56	0,55	0,54	0,52	0,49	0,45
S/SST	0	3,89	7,94	15,90	43,67	49,41	66,04	92,74	92,97	112,87	167,23	225,42	387,97
Nitrito (mg/L)	0	2,17	4,80	6,12	23,27	41,74	43,06	54,06	68,54	72,05	79,97	83,49	92,28

**Tabela 17M:** Dados obtidos na determinação da atividade nitrificante referente ao 273º dia de operação utilizando 3,52 gSS/L.

Pulso	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
N-NH <sub>4</sub> (mg/L)	0	13,42	27,23	38,94	61,96	87,98	94,81	112,13	136,29	152,26	178,93	232,48	375,72	562,80	772,72	1079,18	1256,57
QO <sub>2</sub> X	0	0,44	0,77	1,20	1,39	1,52	1,69	1,79	1,82	1,87	1,91	1,95	1,88	1,81	1,75	1,60	1,53
QO <sub>2</sub> (SST)	0	0,12	0,22	0,34	0,39	0,43	0,48	0,51	0,52	0,53	0,54	0,55	0,53	0,51	0,50	0,45	0,43
S/SST	0	3,81	7,73	11,05	17,58	24,97	26,90	31,82	38,68	43,21	50,78	65,97	106,62	159,70	219,27	306,24	356,58
Nitrito (mg/L)	0	0,69	1,44	4,37	9,36	17,57	21,95	38,23	42,62	50,10	54,50	58,46	82,20	78,21	87,01	94,92	101,08



### APÊNDICE 17 (Continuação)

**Tabela 17N:** Dados obtidos na determinação da atividade nitrificante referente ao 273º dia de operação utilizando 5,83 gSS/L.

Pulso	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
N-NH <sub>4</sub> (mg/L)	0	15,92	31,30	52,43	76,09	89,68	128,60	142,26	191,18	251,51	372,17	574,63	734,21	982,82	1046,06	1317,04
QO <sub>2</sub> X	0	0,93	2,10	2,23	2,53	2,66	3,08	2,94	3,28	3,26	3,38	3,27	3,26	3,21	3,18	3,08
QO <sub>2</sub> (SST)	0	0,16	0,36	0,38	0,43	0,46	0,53	0,50	0,56	0,56	0,58	0,56	0,56	0,55	0,54	0,53
S/SST	0	2,73	5,37	8,99	13,05	15,38	22,06	24,40	32,79	43,14	63,84	98,56	125,94	168,58	179,43	225,91
Nitrito (mg/L)	0	3,33	6,56	14,48	21,52	29,87	36,91	56,26	74,73	77,33	91,40	104,60	127,47	134,50	133,62	138,02

**Tabela 17N:** Dados obtidos na determinação da atividade nitrificante referente ao 293º dia de operação.

Pulso	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
N-NH <sub>4</sub> (mg/L)	0	24,80	56,50	77,98	105,83	111,02	119,90	147,64	213,88	278,72	318,94	342,59	423,03	588,64	843,70	1082,64
QO <sub>2</sub> X	0	0,27	0,58	0,60	0,62	0,65	0,66	0,67	0,65	0,64	0,61	0,60	0,58	0,50	0,43	0,37
QO <sub>2</sub> (SSV)	0	0,34	0,71	0,74	0,77	0,81	0,81	0,83	0,81	0,79	0,75	0,74	0,71	0,62	0,53	0,45
QO <sub>2</sub> (SST)	0	0,23	0,48	0,50	0,52	0,55	0,55	0,56	0,55	0,53	0,51	0,50	0,48	0,42	0,36	0,31
S/SST	0	20,73	47,24	65,20	88,49	92,83	100,25	123,44	178,83	233,04	266,67	286,45	353,71	492,17	705,43	905,22
Nitrito (mg/L)	0	1,57	2,98	5,62	8,42	9,82	12,99	14,05	18,27	24,95	26,36	28,47	30,23	31,28	32,69	

## APÊNDICE 18

### Determinação do $K_{La}$

**Tabela 18A:** Dados obtidos experimentalmente na determinação do  $K_{La}$  para o sistema utilizado nos ensaios de atividade nitrificante.

Condições operacionais: T= 35° C; 300rpm			
Água		Meio Nutriente	
Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)	Tempo (min)	OD (mgO <sub>2</sub> /L)
0	0,06	0	0,06
1	0,06	1	0,06
2	0,06	2	0,07
3	0,06	2,5	0,08
3,25	0,07	3,25	0,09
3,5	0,07	4	0,1
4	0,07	4,5	0,11
4,5	0,08	4,75	0,12
5,25	0,09	5	0,13
6	0,1	5,5	0,15
6,5	0,11	6	0,16
7	0,12	6,75	0,17
7,75	0,13	7	0,18
8	0,13	7,5	0,19
8,25	0,14	8	0,2
8,75	0,15	8,5	0,21
9	0,16	8,75	0,22
9,75	0,17	9	0,23
10	0,18	9,25	0,24
10,5	0,19	9,75	0,25
11	0,2	10,25	0,26
11,5	0,21	10,5	0,27
12	0,22	10,75	0,28
12,5	0,24	11	0,29
12,75	0,25	11,25	0,3
13	0,26	11,5	0,31
13,25	0,27	12	0,32
13,5	0,28	12,25	0,33
13,75	0,29	12,5	0,34
14	0,3	12,75	0,35
14,25	0,31	13	0,36
14,5	0,32	13,25	0,37
14,75	0,33	13,75	0,38
15	0,34	14	0,39
15,25	0,35	14,25	0,4

## APÊNDICE 18 (Continuação)

**Tabela 18A (Continuação)**

<b>Tempo (min)</b>	<b>OD (mgO<sub>2</sub>/L)</b>	<b>Tempo (min)</b>	<b>OD (mgO<sub>2</sub>/L)</b>
16	0,37	14,5	0,41
16,25	0,38	14,75	0,42
16,5	0,39	15	0,43
16,75	0,4	15,5	0,44
17	0,41	15,75	0,45
17,25	0,42	16	0,46
17,5	0,42	16,25	0,47
17,75	0,43	16,5	0,48
18	0,44	16,75	0,49
18,25	0,45	17	0,5
18,5	0,46	17,25	0,51
18,75	0,47	17,5	0,52
19	0,48	18	0,53
19,25	0,49	18,25	0,54
19,5	0,5	18,5	0,55
19,75	0,51	18,75	0,56
20	0,52	19	0,57
20,25	0,53	0	0,06
20,5	0,54		
20,75	0,55		
21	0,56		
21,25	0,57		
21,5	0,58		
21,75	0,59		
22	0,6		
22,5	0,62		
23	0,65		
23,5	0,67		
24	0,69		
24,5	0,71		
25	0,73		